INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2014 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EVOLUCIÓN
Los grandes carnívoros africanos

ASTRONOMÍA
Mundos con dos soles

MEDICINA
Complejidad biológica del cáncer

INFORME ESPECIAL
LA ERA DE LOS MACRODATOS

Nuevos retos sociales y técnicos en un mundo cada vez más digitalizado



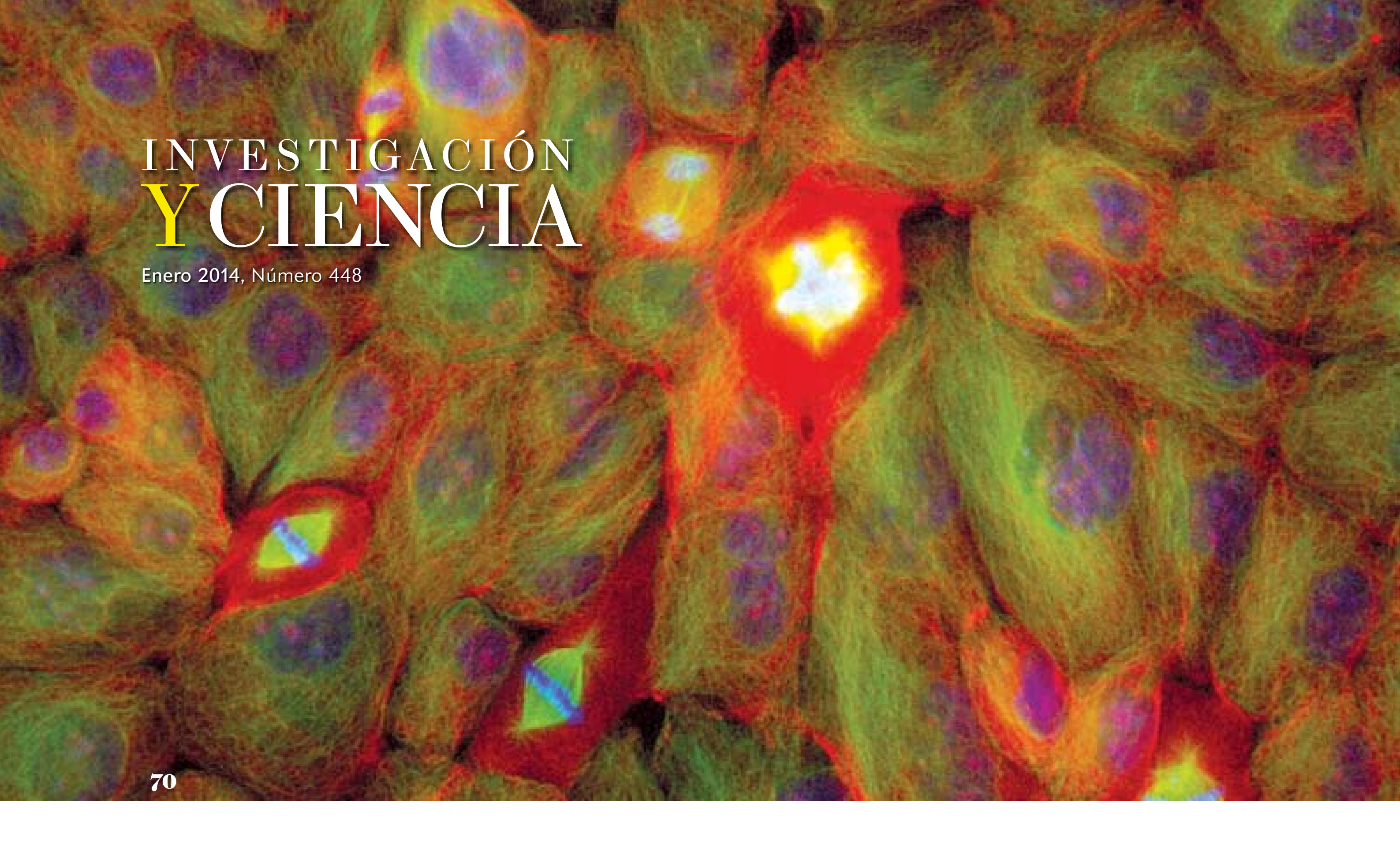
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

LA ERA DE LOS MACRODATOS | MUNDOS CON DOS SOLES | GRANDES CARNÍVOROS AFRICANOS

ENERO 2014 N.º 448

9 770210 136004 00448

6,50 EUROS

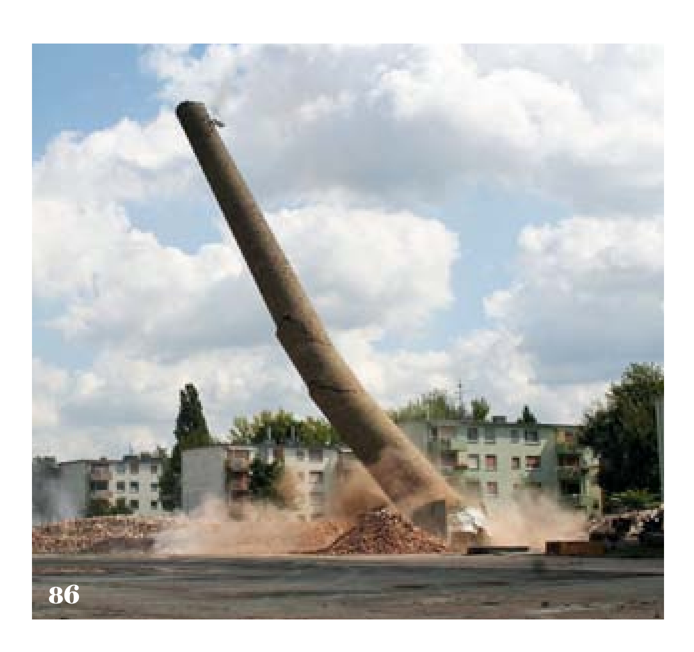


ARTÍCULOS

JENNIFER C. WATERS, SCIENCE SOURCE


7

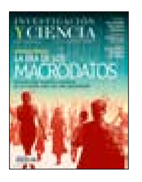

43


86

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



En un mundo cada vez más digitalizado, crece el número de personas que viven conectadas permanentemente a Internet, dejando tras de sí pistas de su actividad. El gran volumen de datos personales acumulados permite abordar numerosos problemas sociales y científicos, pero también amenaza nuestra privacidad. Asimismo, este diluvio de información requiere el diseño de nuevas memorias digitales universales. Ilustración de IyC (siluetas de Thinkstock).

redaccion@investigacionyciencia.es



Noviembre 2013

RAREZAS CUÁNTICAS

En el artículo «Bayesianismo cuántico» [Investigación y Ciencia, agosto de 2013], Hans Christian von Baeyer describe una nueva interpretación de la mecánica cuántica según la cual la función de onda no representaría más que una herramienta matemática empleada por el observador para cuantificar su grado de creencia personal en que un sistema cuántico exhiba unas propiedades u otras.

Pero ¿qué ocurre entonces con el experimento de la doble rendija, en el que la función de onda de un electrón interfiere con la porción de sí misma que pasa por la otra ranura? ¿Pueden nuestras creencias sobre el camino tomado por el electrón interferir consigo mismas?

Gordon Hazen
Universidad Noroccidental de EE.UU.

En su artículo, Von Baeyer emplea hombres de paja para criticar la interpretación frecuentista de la probabilidad. Cita el ejemplo propuesto por Marcus Appleby, de la Universidad de Londres, en el que una misma persona gana la lotería cada semana durante diez años. Appleby y Von Baeyer ridiculizan a un hipotético frecuentista que, a pesar de los claros indicios de amaño, aún seguiría apostando. Ese frecuentista imaginario es uno al que se le obliga a asumir que todos los sorteos constituyen sucesos independientes. Ellos, sin embargo, se permiten el lujo de sospechar que no es el caso.

Tanto la interpretación frecuentista como la bayesiana aceptan la posible independencia de sucesos y emplean el teorema de Bayes para calcular probabilidades condicionadas. En este sentido, el argumento empleado por Von Baeyer pasa por alto las verdaderas diferencias entre uno y otro caso.

Zachary Miller
Fleetwood, Pensilvania

Responde Von Baeyer: *Hazen acierta al señalar que, en el experimento de la doble rendija, la función de onda de un electrón incluye el paso por ambas ranuras. Los proponentes del bayesianismo cuántico no discuten ese hecho. La diferencia con otras interpretaciones de la mecánica cuántica radica en que, para ellos, la función de onda únicamente reside en la mente del observador; en particular, no guardaría ninguna relación con el verdadero camino seguido por el electrón. Se trataría de una herramienta de cómputo para determinar la inclinación del observador a la hora de apostar por el resultado de futuros experimentos que intentasen detectar el electrón, pero sin mayor trascendencia que la de, por ejemplo, el número de factura de una lavandería.*

Puede que el ejemplo escogido para ilustrar las diferencias entre las interpretaciones bayesiana y frecuentista, que Miller considera injusto, fuese extremo. Consideremos en su lugar una serie de lanzamientos de moneda efectuados por la misma persona. Obtener diez caras seguidas puede resultar algo extraño, pero no completamente inusual. Sin embargo, ¿qué ocurriría si se sucediesen cien, mil o un millón de caras? No habría ningún argumento racional para sospechar de un amaño en los lanzamientos, pues todos esos resultados son perfectamente posibles incluso si empleamos una moneda perfecta. Sin embargo, cualquier persona normal comenzaría a dudar a partir de cierto número (inverosímil) de caras seguidas. Pero dicho número es muy subjetivo, ya que cada observador juzgará inverosímil un número distinto de repeticiones consecutivas. La interpretación frecuentista no deja hueco a ese comportamiento humano, mientras que la bayesiana sí.

DEBATE TRANSGÉNICO

En «Cultivos transgénicos: sigue el debate» [por David H. Freedman; Investigación y Ciencia, noviembre de 2013], el autor menciona que solo hay dos cultivos transgénicos autorizados en Europa, que ocho naciones de la UE los han prohibido y que los países asiáticos aún deben aprobar la mayoría de los cultivos modificados genéticamente.

En realidad, en Europa hay tres cultivos aprobados para la siembra, ya que debe incluirse el maíz Bt 176 de Syngenta, hoy en desuso. Existen además unas 30 variedades transgénicas que, aunque no han sido autorizadas para el cultivo, sí tienen permitida su importación; entre ellas, soja, algodón, maíz y colza. Tampoco puede hablarse de que ocho países hayan prohibido el cultivo de las variedades autorizadas, ya que se trata de una competencia de la UE. Lo que han hecho esas naciones es aplicar una cláusula de salvaguarda para posponer la aplicación de la normativa. Respecto a la situación en Asia, tanto China como la India son dos potencias en el uso y desarrollo de cultivos modificados genéticamente. Y, hace poco, Bangladés presentó una variedad de berenjena transgénica desarrollada por sus propios científicos.

Por último, el artículo menciona que «modificar un solo gen podría desencadenar un efecto dominó inesperado que incluyese la producción de proteínas tóxicas o alergénicas». Conviene matizar que hoy por hoy no se conoce ningún mecanismo por el que añadir un gen foráneo a una planta pueda producir un efecto perjudicial; lo cual, unido al estricto proceso de aprobación que debe superar un transgénico antes de salir al campo, convierte esa clase de argumentos en especulaciones ajenas al debate científico apoyado en pruebas empíricas.

José Miguel Mulet
Universidad Politécnica de Valencia

Erratum corrige

Como señalan nuestros lectores António Alfonso Gonçalves y Antonio Prieto Rodríguez, en el artículo «Historias del calendario», de Norbert Treitz [Investigación y Ciencia, octubre de 2013], se menciona erróneamente que la expedición de Magallanes regresó a España en 1582. El año correcto es 1522.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

BIOLOGÍA

Una bacteria traicionera

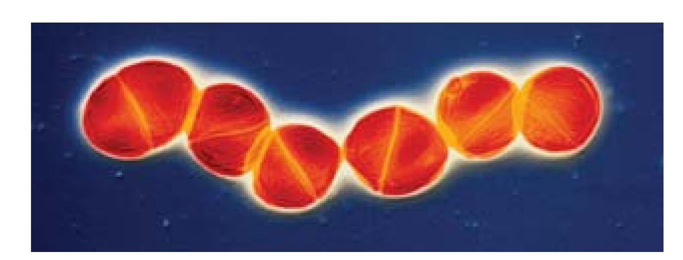
Las bacterias medran por doquier, a nuestro alrededor y en nuestro interior. Unas son inocuas, otras beneficiosas y otras, claro está, causan enfermedades. Por último, algunas, como la abundante *Streptococcus pneumoniae*, escapan a las clasificaciones: son oportunistas que pueden cambiar de bando con suma rapidez.

En condiciones normales, *S. pneumoniae* vive en las fosas nasales sin causar problemas de salud. Pero de vez en cuando, en su afán por huir de un peligro coloniza otras zonas del cuerpo y nos hace enfermar. Provoca neumonía, una dolencia grave que supone la principal causa de muerte infantil en el mundo, aunque según matiza Anders Hakansson, microbiólogo de la Universidad de Buffalo, «es un patógeno accidental».

Se sabía que existía un estrecho lazo entre la gripe y la ulterior infección por *S. pneumoniae*, pero se ignoraba por qué la bacteria se volvía virulenta, por lo que Hakansson y sus colaboradores se propusieron investigarlo.

Descubrieron que el cambio parecía estar desencadenado por la respuesta del sistema inmunitario contra la gripe. Cuando el cuerpo humano aumenta de temperatura y libera hormonas del estrés (como la noradrenalina) para hacer frente al virus de la gripe, la bacteria percibe esas modificaciones en el entorno y reacciona. Los investigadores explican en la revista *mBio* que *S. pneumoniae* se propaga desde sus colonias habituales y comienza a expresar genes que causan estragos en las células respiratorias.

La capacidad de *S. pneumoniae* para captar las hormonas y otras señales de alteración procedentes de las células humanas ejemplifica un fenómeno denominado comunicación entre reinos (en este caso, una bacteria que interpreta señales del reino animal), considerado cada vez más un mecanismo biológico primordial. Hakansson aclara que *S. pneumoniae* es una bacteria saprófita de los humanos, por lo que resulta lógico que haya desarrollado mecanismos para interpretar los cambios en su ambiente. Como él mismo explica: «Somos el nicho ecológico de esta bacteria». *—Robyn Braun*



NEUROCIENCIA

Soportar el golpe

Hace 40 años, el genetista Barry Ganetzky dejó inconsciente a un grupo de moscas de la fruta cuando, por accidente, partió con la mano el vial que las contenía. «Todas fueron a parar al fondo, no caminaban y se movían con una descoordinación total, recostadas sobre un flanco», recuerda.

En aquel momento no concedió mayor importancia al incidente, pero cuando empezaron a conocerse los efectos de las lesiones craneales sufridas por atletas profesionales, pensó en la posible utilidad de las moscas de la fruta *Drosophila*. Él y sus colaboradores de la Universidad de Wisconsin en Madison han comenzado a indagar si los insectos podrían ayudar a desvelar los mecanismos celulares involucrados en los traumatismos craneoencefálicos humanos.

Después de décadas de estudio, estas lesiones parecen resistirse al escrutinio. Sabemos que se producen como consecuencia de una rápida aceleración o desaceleración (a causa de un accidente automovilístico o del impacto de un balón) que lanza el encéfalo contra la pared interna del cráneo. El impacto puede desencadenar una cascada de reacciones celulares que agravan aún más los daños sufridos por el cerebro y las neuronas, lo que tal vez deje secuelas de carácter cognitivo.



Con las moscas de la fruta se podrían realizar estudios de mayor entidad y solidez sobre el traumatismo craneoencefálico. Aparte del fácil mantenimiento de *Drosophila*, su breve vida permite estudiar cuestiones relacionadas con la salud a lo largo de la vida de un individuo. Estos dípteros ya se utilizan en los estudios sobre las enfermedades de Alzheimer y Parkinson. «En principio, una neurona de una mosca funciona igual que la de un humano», asegura Ganetzky. A semejanza del cerebro humano, el de la mosca, del tamaño de un granito de arena, está protegido por un duro caparazón de exoesqueleto y una capa de líquido que amortigua los impactos.

En un estudio reciente, Ganetzky y sus colaboradores introdujeron moscas de la fruta en un vial y lo golpearon contra una superficie acolchada. Después practicaron las autopsias a los insectos conmocionados. Los resultados del estudio, publicados el pasado mes de octubre en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, demuestran que las moscas sufrieron daños cerebrales y experimentaron muchos de los síntomas observados en humanos con traumatismo craneoencefálico, como pérdida del conocimiento, descoordinación y aumento del riesgo de muerte. Como sucede con los humanos, los efectos dañinos del traumatismo dependen de la fuerza del impacto, así como de la edad y la constitución genética del individuo.

El equipo de Ganetzky espera que los estudios con moscas permitan obtener algún día una prueba diagnóstica que detecte los traumatismos a través de marcadores sanguíneos y, si es posible, un tratamiento que frene el deterioro de las células cerebrales.

—Sarah Fecht

SCIENCE SOURCE (*S. pneumoniae*); DARWIN DALE, SCIENCE SOURCE (*drosophila*)

ANIMACIÓN POR ORDENADOR

La peliaguda física del fútbol

Cuando el videojuego de fútbol *FIFA 14* salió al mercado este otoño, sus creadores alardearon de que, por fin, el balón volaría de modo impecable. En las versiones anteriores, a veces parecía como si la pelota «flotase» en medio de una trayectoria demasiado lineal.

El año pasado, un equipo de ingenieros y expertos en animación prometieron abordar el problema desde la raíz. Tras examinar las partes del programa encargadas de realizar los cálculos balísticos, dieron con el fallo: el coeficiente de resistencia aerodinámica estaba mal. Dicho parámetro, que da cuenta de la oposición al movimiento que experimenta un cuerpo que avanza en el seno de un fluido, determina la velocidad y la trayectoria de los objetos.

«El momento en que más deprisa se mueve el balón es justo al despegar de la bota; inmediatamente después, la resistencia del aire comienza a frenarlo y sigue así hasta que alcanza su altura máxima», explica John Eric Goff, físico del Colegio Universitario de Lynchburg y autor de *Gold medal physics: The science of sports* («La física de las medallas de oro: La ciencia del deporte»). «A partir de ahí, su velocidad debería aumentar a medida que cae.»

Las versiones anteriores del videojuego violaban las leyes de la física, ya que el balón se aceleraba y deceleraba a un ritmo que no dependía de la velocidad inicial. «El balón se frenaba de igual manera tanto si avanzaba a 50 u 80 kilómetros por hora como si lo hacía a 10», reconoce Aaron McHardy, experto en jugabilidad en EA Sports, la distribuidora de *FIFA*.

Además, los errores en la resistencia aerodinámica provocaban que el balón tampoco rotase como debía. Al girar sobre su eje, una pelota genera un remolino de aire a su alrededor que, a su vez, ejerce cierto efecto sobre la trayectoria del balón: el efecto Magnus. Dado que las versiones anteriores no calculaban el efecto Magnus de la manera correcta, la curvatura de la trayectoria resultaba algo monótona. «Una vez corregido el error, el balón rota como debe y describe curvas mucho más variadas», asegura Hays. «Por fin, ahora la pelota se precipita y vira del mismo modo que en el mundo real.»

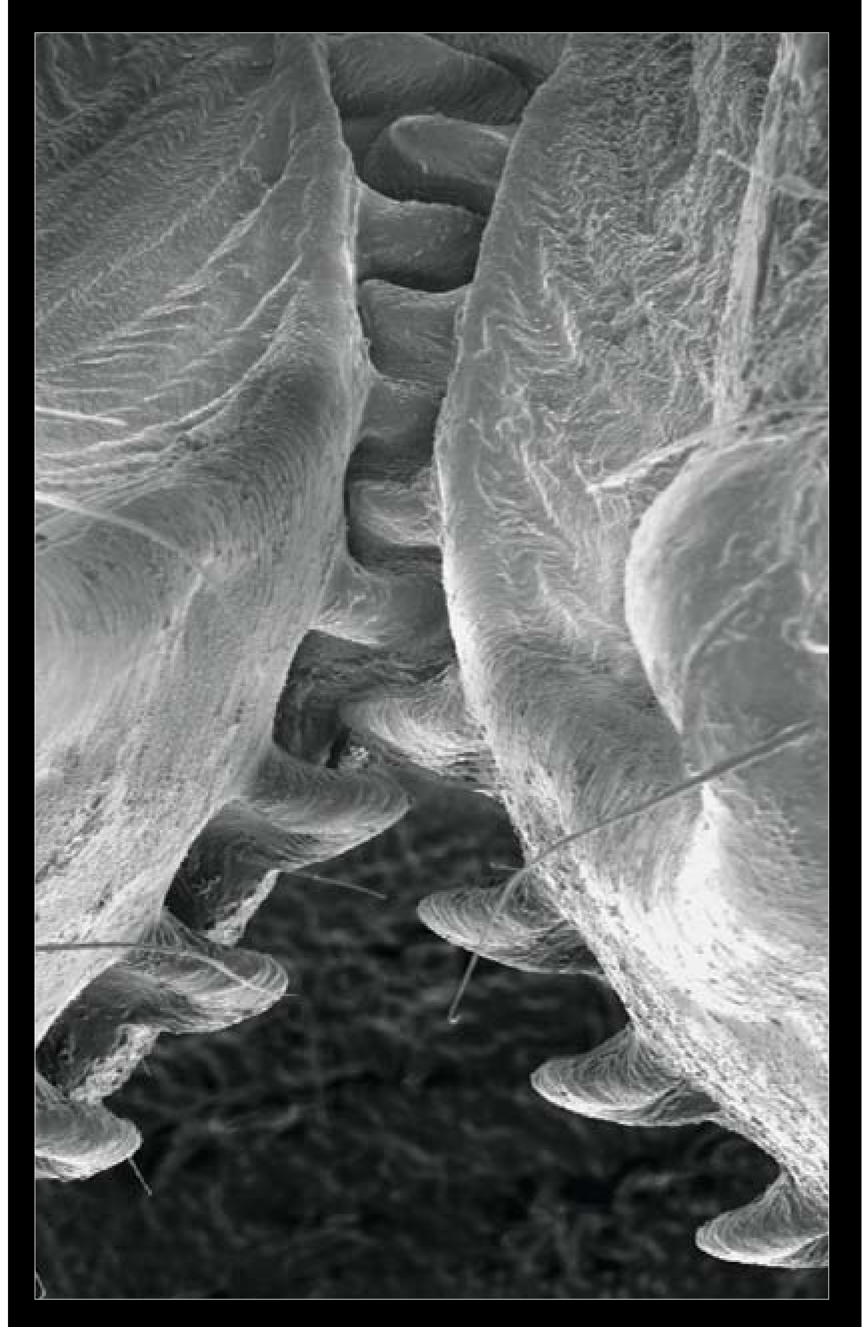
—Julianne Chiaet

¿QUÉ ES ESTO?

El insecto *Issus coleoptratus* no puede volar, pero sí saltar. Este diminuto animal pertenece al grupo taxonómico de los Fulgoromorfos. Cuando los investigadores se dieron cuenta de que las patas del *I. coleoptratus* se movían a solo treinta microsegundos de la sincronización perfecta, quedó claro que contaba con un mecanismo especial en sus extremidades. De hecho, dispone de «engranajes» en la base de sus patas, como descubrió un grupo de biólogos del Reino Unido con la ayuda de un microscopio electrónico de barrido.

Este fulgoromorfo es el primer animal que sabemos que posee unas estructuras en el cuerpo que funcionan como engranajes, los cuales sincronizan el impulso de propulsión de las patas traseras. Los investigadores publicaron el descubrimiento en *Science*.

El mecanismo parece tener una vida útil muy reducida. A medida que *I. coleoptratus* pasa del estado de ninfa al de adulto, esos engranajes van desapareciendo. Los despegues del insecto se hacen más rápidos a medida que crece y desarrolla distintas técnicas de salto, dejando atrás los engranajes, como unos ruedines de bicicleta abandonados. *—Rachel Feltman*



CORTESÍA DE MALCOLM BURROWS

ASTRONOMÍA

Beber de la fría corriente cósmica

¿Cómo llegaron las jóvenes galaxias del universo primitivo a ser los monstruos que hoy vemos? Hace más de diez años se formuló una explicación: alimentaban su prodigiosa formación de estrellas con la captación de gas frío. El astrofísico teórico Avishai Dekel, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, planteó que unas corrientes delgadas de gas intergaláctico habrían servido de líneas de suministro: penetrarían en el caliente halo de la galaxia en ciernes y cebarían el crecimiento. Pero no era fácil observarlas.

Gracias a una alineación cósmica debida al azar, parece que se ha visto ahora una. Neil Crighton, del Instituto Max Planck de Astronomía de Heidelberg, examinó con sus colaboradores un cuásar brillante y lejano, cuya luz atravesó una galaxia interpuesta en el camino hacia la Tierra cuando el universo tenía solo tres mil millones de años. Los constituyentes químicos de la galaxia absorbieron determinadas longitudes de onda de la luz del cuásar, en la que así dejaron impresas las características del gas que nutría a la galaxia.

El gas que rodeaba a la joven galaxia tenía todas las propiedades que cabe esperar de una corriente fría de acreción, según Crighton, autor principal de un estudio publicado no hace mucho en *Astrophysical Journal Letters*. Entre ellas, la temperatura baja, la densidad alta y una abundancia de elementos que, al contrario que el hidrógeno y el helio, no se formaron en la gran explosión.

Dekel, sin embargo, no quiere cantar victoria basándose en una sola observación. «Habrá que contar con muchas más de ese estilo para que resulten convincentes», dice.

—Ron Cowen

ZOOLOGÍA

La coordinación en los bancos de peces

La carpita dorada (*Notemigonus crysoleucas*) hace gala de exhibiciones de natación sincronizada que impresionarían al juez olímpico más severo. La habilidad de las carpitas y de otros peces para cambiar de dirección al unísono viene intrigando desde hace tiempo a los científicos, quienes han ideado métodos para describir con términos matemáticos el movimiento de los bancos. Pero en estas aproximaciones tienden a realizarse simplificaciones que no tienen en cuenta toda la información sensorial que el pez procesa en tiempo real.

Para hacerse una mejor idea del comportamiento de los peces, el biólogo de la Universidad de Princeton Iain Couzin y sus colaboradores idearon un método para que las carpitas se movieran en tropel en el momento oportuno. Primero enseñaron a un puñado de individuos a nadar hacia una luz verde para obtener alimento; después los introdujeron en un grupo más grande. Al encender la luz, los peces entrenados se dirigían hacia ella y desencadenaban una serie de reacciones en los demás compañeros del cardumen, que acababan siguiendo a los líderes.

El equipo de Couzin filmó la acción con una cámara de alta velocidad, lo que permitió acotar el campo visual de cada pez a partir de su ubicación y posición de la cabeza. Los investigadores explican en *Current Biology* que, en contra de lo que se supone a menudo, cada pez decide adónde ir según la dirección que toman en promedio los compañeros que se hallan dentro de su campo visual, no la que adquieren sus vecinos inmediatos.

«Averiguamos el momento exacto en que un pez comenzaba a nadar hacia la luz y comprobamos que respondía a una parte de los individuos que él veía en movimiento», explica Couzin.



BANCO de barracudas.

Mientras tanto, otros investigadores intentan conocer qué impulsa a algunos peces a formar bancos. El equipo de Katie Peichel, bióloga del Centro de Investigación del Cáncer Fred Hutchinson, en Seattle, ha descubierto que la formación de cardúmenes en el espinosillo (*Gasterosteus aculeatus*) depende de una conducta vinculada como mínimo a dos grupos de genes. Los expertos describieron en *Current Biology* que un grupo de genes controla la propensión del pez a formar grandes bancos, mientras que el otro influye en su aptitud para nadar en formación, en sincronía con sus vecinos.

Juntos, los rasgos de conducta y las capacidades sensoriales permiten a los peces gregarios ejecutar sorprendentes maniobras para eludir a los depredadores. «Nadar en bancos les hace percibir el mundo de un modo distinto», asegura Couzin.

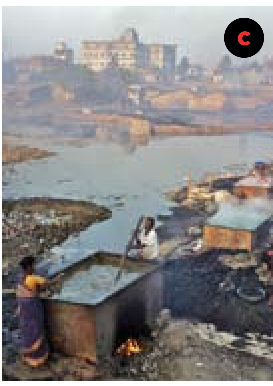
—Carrie Arnold

THOMAS FUCHS (*galaxias*); DOUG PERRINE, GETTY IMAGES (*peces*)

MEDIOAMBIENTE

Escoge tu veneno






JANE HAHN, CORBIS (a); DIDIER MARTI, GETTY IMAGES (b); GETTY IMAGES (c); PIUS UTOMI EKPEI, GETTY IMAGES (d); MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES (*Diplodocus*)

Agbogbloshie, suburbio de Acra, la capital de Ghana, es donde los aparatos electrónicos de Europa van a morir. Ghana recibe al año alrededor de 237.000 toneladas de ordenadores, móviles, televisores y otros artefactos electrónicos, en su mayor parte procedentes de Europa, y con ellos hace de Agbogbloshie uno de los mayores basureros electrónicos de África. Quizá sea ya el más sucio. Se ha ganado la dudosa distinción de figurar junto a Chernóbil y la zona industrial de Norilsk, en Rusia, en la lista del Instituto Blacksmith de los diez sitios más contaminados del mundo. Los trabajadores de Agbogbloshie queman cables eléctricos aislantes para recuperar el valioso cobre que llevan dentro, pero de ese modo liberan plomo y otros metales pesados.

«Todo el mundo quiere un ordenador portátil, quiere los aparatos modernos», decía en una rueda de prensa celebrada el pasado mes de noviembre Jack Caravanos, profesor en la Escuela de Salud Pública de la Universidad de la Ciudad de Nueva York y asesor técnico en Blacksmith. «Se está viendo que parar la generación de basura electrónica es muy complicado, muy difícil.»

El Instituto Blacksmith, junto con la Cruz Verde suiza, confeccionó las nuevas clasificaciones tras examinar más de dos mil sitios de 49 países. Calcula que los contaminantes tóxicos están perjudicando la salud más de 200 millones de personas en los países en vías de desarrollo.

Varios lugares que aparecían en la lista anterior, de 2006, ya no aparecen en la nueva gracias a operaciones de limpieza. En Haina, en la República Dominicana, se ha enterrado en un vertedero especial un suelo muy contaminado con plomo de una planta de reciclado de baterías. Blacksmith considera que se trata del mayor éxito entre los sitios designados en 2006. China e India han desaparecido también de los diez primeros puestos. El Gobierno chino ha cerrado unas 1800 fábricas contaminantes en Linfén, e India ha llevado a cabo una evaluación y saneamiento de sitios contaminados de toda la nación.

Aunque ninguno de los lugares incluidos en la lista se encuentra en EE.UU., Japón o Europa Occidental, en buena medida la contaminación deriva de la forma de vida de los países ricos, señala Stephan Robinson, de la Cruz Verde suiza. Parte nace de la producción de materias primas para la fabricación de bienes de consumo (las tenerías de Bangladesh proveen de cuero para los zapatos italianos que se venden en Nueva York o en Zúrich). Y parte (como es el caso de Agbogbloshie) la generan las cosas que las naciones prósperas ya no quieren. —*David Biello*

LOS DIEZ SITIOS MÁS TÓXICOS

Agbogbloshie, Ghana (a) Desechos electrónicos	**Kabwe, Zambia** Minería del plomo
Chernóbil, Ucrania Accidente nuclear	**Kalimantan, Indonesia** Minería del oro
Cuenca del río Citarum, Indonesia (b) Contaminación industrial y doméstica	**Río Matanza-Riachuelo, Argentina** Contaminación industrial
Dezerzhinsk, Rusia Fabricación química	**Delta del río Níger, Nigeria** (d) Vertidos de petróleo
Hazaribagh, Bangladesh (c) Tenerías	**Norilsk, Rusia** Minería y fundición

LOS SITIOS DE LA LISTA SIN CLASIFICACIÓN APARECEN EN ORDEN ALFABÉTICO

AGENDA

CONFERENCIAS

14 de enero
Perspectivas biotecnológicas para mejorar la tolerancia a la sequía en leguminosas de interés agrícola
Josefa Muñoz Alamillo, Universidad de Córdoba
Facultad de ciencias
Universidad de Córdoba
Córdoba
www.uco.es/ciencias/divulgacion-cientifica > conferencias

16 de enero
Ciencia y sentimiento de la naturaleza en los orígenes de la conservación
Santos Casado, Universidad Autónoma de Madrid
Ciclo «Ciencias e ideologías en los parques naturales españoles»
Instituto de Estudios Catalanes
Barcelona
arban.espais.iec.cat/agenda

22 de enero
La energía desde una perspectiva social
Muhammad Saggaf, Centro de Investigación para el Estudio del Petróleo (KAPSARC)
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

EXPOSICIONES

***Diplodocus carnegii*: 100 años en el Museo Nacional de Ciencias Naturales (1913-2013)**
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es



OTROS

25 de enero – Experimentos en directo
Experimentos históricos II. Electricidad, magnetismo, óptica y física moderna
Julio Güémez, Universidad de Cantabria
Ciclo «Los sábados de la física»
Facultad de ciencias
Universidad de Cantabria
Santander
www.unican.es/campus-cultural > Ciencia

FÍSICA NUCLEAR

Núcleos con forma de pera

Se ha caracterizado con precisión la geometría exótica de ciertos núcleos atómicos. Dos expertos ofrecen sus puntos de vista sobre el significado de estos resultados para la física nuclear y la física de partículas

Novedosas antenas nucleares

En el centro de cada átomo se encuentra su núcleo, un objeto con una gran concentración de carga eléctrica y tan denso que da cuenta del 99,999 por ciento de la masa del átomo. Si bien todo esto se conoce desde que Ernest Rutherford descubriese el núcleo atómico, hace ahora un siglo, aún quedan por entender numerosos aspectos de la materia nuclear. En un artículo publicado el pasado mes de mayo en la revista *Nature*, una colaboración internacional comunicó la primera observación de núcleos atómicos con una geometría muy poco usual.

En un átomo, el campo eléctrico generado por el diminuto núcleo posee simetría esférica, lo que implica que la nube de electrones que define sus propiedades químicas y mecánicas exhibe también dicha simetría. El núcleo, sin embargo, se comporta de forma muy distinta. Genera por sí mismo el campo nuclear fuerte que lo mantiene unido, el cual actúa sobre todos los nucleones (neutrones y protones). Como tal, el «centro» de la estructura resultante se encuentra mucho peor definido que en los átomos. Los núcleos atómicos pueden polarizarse con facilidad y adquirir formas no esféricas. De hecho, más de un tercio de todos ellos muestran una mayor estabilidad si adoptan una forma alargada, similar a la de un balón de rugby.

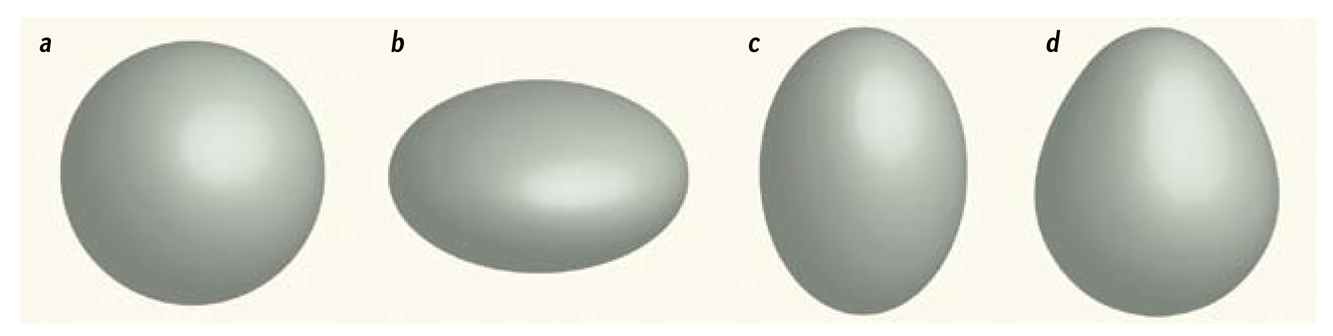
Cabe esperar que las correlaciones cuánticas entre los nucleones induzcan ocasionalmente geometrías más exóticas, como aquellas similares a una pera, un plátano o una pirámide. Hasta la fecha, sin embargo, muy pocas de ellas se han observado en la naturaleza. Tales núcleos proporcionan una oportunidad para explorar las correlaciones cuánticas asociadas, pues permiten comparar los modelos teóricos con los datos experimentales.

El trabajo publicado en *Nature*, firmado por Liam P. Gaffney, de la Universidad de Liverpool, y una cincuentena de colaboradores más, se proponía comprobar las correlaciones octupolares a las que se supone responsables de que ciertos núcleos adquieran forma de pera. Tales correlaciones aparecen solo cuando una combinación particular de estados cuánticos se encuentra alrededor de la superficie de Fermi, la cual demarca la frontera entre los orbitales cuánticos ocupados por partículas y aquellos que no lo están. La excitación de pares de nucleones correlacionados de forma coherente entre dichos estados favorece que todo el núcleo adopte forma de pera. De todos los núcleos conocidos, los expertos habían predicho que los isótopos de radón, radio, torio y uranio mostrarían las correlaciones octupolares más intensas, lo cual conduciría a que la configuración preferida del estado fundamental adquiriese dicha geometría.

Aunque su existencia se había vaticinado hacía tiempo, buena parte de los candidatos más prometedores no eran núcleos estables, por lo que primero debían sintetizarse. A efectos prácticos, la distribución de carga en el núcleo opera como una pequeña antena que gira sobre sí misma y que emite radiación electromagnética. La radiación generada por un núcleo con forma de pera debería mostrar un patrón en el que las componentes dipolar y octupolar del campo eléctrico se encontrasen magnificadas con respecto a sus valores habituales. En su artículo, Gaffney y sus coautores describieron la medición directa de dichos patrones de radiación.

El experimento es especial también por otros motivos. Los autores no emplearon núcleos existentes en la naturaleza, sino que sintetizaron ciertos isótopos de radón y radio de vida media muy corta. Estos fueron recolectados, despojados de gran parte de sus electrones y acelerados hasta un 10 por ciento de la velocidad de la luz. Cuando un haz compuesto por núcleos radiactivos pesados es dispersado por láminas metálicas delgadas, las «antenas» se excitan y emiten radiación. Esta técnica de excitación coulombiana —una forma puramente electromagnética de explorar la geometría nuclear— es bien conocida desde hace tiempo.

Los autores hallaron el valor de la carga (Z) a partir de la cual los núcleos mostraban una componente octupolar eléctrica magnificada. En el caso del radón, con un número de protones igual a 86, dicha componente era modesta; en el del radio ($Z = 88$) resultó ser mucho mayor. Los expertos esperan que los núcleos de número atómico mayor, como el



FORMAS NUCLEARES: El núcleo de un átomo no tiene por qué ser esférico (*a*). Puede también adoptar otras formas, como la de un esferoide achatado (*b*) o elongado (*c*). Un estudio reciente ha observado por vez primera una nueva geometría nuclear (*d*).

torio ($Z = 90$) o el uranio ($Z = 92$), exhiban unos patrones de radiación con componentes octupolares aún más intensas. Sin embargo, para producir tales núcleos en cantidad suficiente aún habremos de esperar a la próxima generación de aceleradores.

Cabe esperar que, con los nuevos aceleradores y detectores que está previsto que se construyan en varios puntos del globo, esta «fabricación a medida» de isótopos continúe y que se efectúen mediciones más precisas de sus interacciones coulombianas. Al seleccionar características nucleares específicas, estos métodos nos permitirán entender mejor los engranajes internos del núcleo atómico.

Aparte de poner a prueba los modelos de física nuclear, otra de las características de estas diminutas «gotas» con forma de pera reside en que su centro de masas no coincide con el centro de cargas. Este efecto aumentaría la sensibilidad de la búsqueda de un posible momento dipolar eléctrico estático, así como la de otros fenómenos físicos novedosos.

—C. J. (Kim) Lister
Departamento de física y física aplicada
Universidad de Massachusetts

Laboratorios de física de partículas

La observación de núcleos atómicos con forma de pera reviste gran interés en otro tipo de investigaciones: la búsqueda de un momento dipolar eléctrico (MDE) permanente en las partículas. Los protones y los neutrones constituyen entidades muy complejas formadas por quarks. Estos permanecen unidos debido al intercambio de gluones, las partículas mediadoras de la interacción nuclear fuerte. Como bien indica su nombre, dicha interacción es muy intensa, lo que implica que las ecuaciones que la describen no pueden resolverse mediante el método habitual, basado en la teoría de perturbaciones (una expansión matemática que proporciona una aproximación fiable cuando la intensidad de la interacción es pequeña).

Durante los últimos años se han efectuado grandes progresos gracias al empleo de técnicas numéricas; sobre todo, aquellas que, a modo de aproximación, tratan el espacio y el tiempo como un retículo formado por celdas diminutas. Con todo, sigue resultando imposible determinar las propiedades básicas del protón o el neutrón a partir de primeros principios. En el caso del núcleo atómico, la situación es aún peor.

A la vista de lo anterior, tal vez sorprenda saber que la materia nuclear constituye un excelente banco de pruebas para explorar el modelo estándar, la teoría que con gran elegancia comprende todo lo que conocemos sobre las partículas y las interacciones fundamentales. Al respecto, son hoy mundialmente famosas las colisiones de protones de muy alta energía realizadas en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra. Sin embargo, a escalas de energía mucho más modestas también pueden efectuarse experimentos de gran precisión para explorar el modelo estándar. Por ejemplo, la búsqueda de desintegraciones nucleares exóticas constituye, hoy por hoy, la única manera de investigar si el neutrino y el antineutrino son o no la misma partícula [*véase* «Mensajeros fantasmales de nueva física», por M. Hirsch, H. Päs y W. Porod; Investigación y Ciencia, junio de 2013].

La búsqueda de un MDE en cualquier partícula, incluido el núcleo atómico, proporcionaría un método indirecto para buscar física más allá del modelo estándar por medio de una de sus simetrías aproximadas: la invariancia bajo inversión temporal (T). En este sentido, los límites actuales sobre el MDE del núcleo de mercurio constituyen uno de los límites más restrictivos.

El modelo estándar respeta la simetría T, aunque solo de forma aproximada. Esto significa que, en la gran mayoría de los casos, las interacciones que gobiernan los procesos entre partículas elementales operan del mismo modo en un proceso dado que en su equivalente invertido en el tiempo (el que resultaría de «rebobinar» el proceso original). Un teorema con bases muy firmes, el teorema *CPT*, establece que todas las interacciones fundamentales deben permanecer invariantes si se intercambian partículas por antipartículas (conjugación de carga, C), derecha por la izquierda (inversión de paridad, P) y estados iniciales por finales (T). La presencia de un MDE implicaría una ruptura de la simetría T, por lo que, como consecuencia del teorema mencionado, acarrearía también una violación de la simetría *CP* (dado que la combinación *CPT* debe respetarse). [*La primera medición directa de la ruptura de simetría T en física de partículas tuvo lugar hace poco; véase* «Ruptura de simetría bajo inversión temporal», por J. Bernabéu y F. Martínez Vidal; Investigación y Ciencia, octubre de 2013.]

El teorema *CPT* relaciona la búsqueda de un MDE con la asimetría entre materia y antimateria observada en el universo. Si bien el modelo estándar deja un pequeño hueco a la ruptura de la simetría *CP*, esta no basta para explicar por qué el cosmos se halla dominado por la materia y posee tan poca antimateria. A fin de resolver el problema, varias propuestas para extender el modelo estándar incorporan nuevas fuentes de violación de la simetría *CP*. Como consecuencia, rompen asimismo la simetría T y, a menudo, postulan partículas con un MDE relativamente elevado.

¿Por qué un MDE violaría la simetría T? En general, las partículas suelen exhibir un momento dipolar magnético (MDM). Este puede imaginarse como debido a una diminuta corriente eléctrica circular, o como un efecto de la rotación de la partícula sobre sí misma. La energía de una partícula adquiere una contribución que depende del ángulo relativo entre el MDE y del MDM. Si invertimos la evolución temporal, la corriente circulará en sentido opuesto, por lo que el vector asociado al MDM se invertirá. Sin embargo, el MDE permanecerá constante. Por tanto, habrá cambiado la alineación relativa entre uno y otro y, con ello, la energía de la partícula. La simetría queda así rota.

Según el modelo estándar, la estructura de un núcleo atómico no basta para generar por sí misma un MDE. Sin embargo, si su magnitud fuese distinta de cero, esta podría amplificarse por efecto de una distorsión en la geometría del núcleo como la que han observado Gaffney y sus coautores. Por tanto, el estudio detallado de tales geometrías resulta esencial para evaluar cuán sensible se muestra la búsqueda de un MDE a posibles fenómenos físicos no contemplados por el modelo estándar, así como para entender las implicaciones de una hipotética medida del MDE. En este sentido, la observación de núcleos atómicos con forma de pera representa un gran avance.

—Jonathan Butterworth
Departamento de física y astronomía
Colegio Universitario de Londres

Artículo original publicado en *Nature* 497, págs. 190-191, 2013. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013

MEDICINA

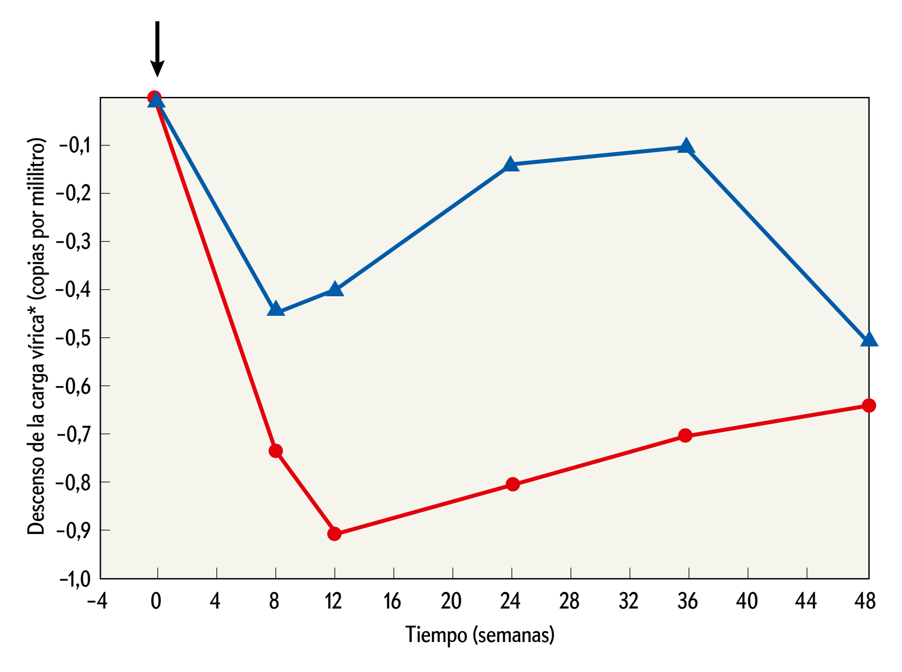
Conclusiones del congreso sobre vacunas contra el VIH

Se debaten los logros y fracasos obtenidos, así como las expectativas de futuro, en el desarrollo de una vacuna contra el sida

El pasado mes de octubre se celebró en Barcelona el congreso «AIDS Vaccine 2013», en el que expertos de todo el mundo presentaron y debatieron los últimos avances científicos logrados en el desarrollo de una vacuna contra el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH). Se trataba de la decimotercera edición de la conferencia, la única reunión internacional dedicada específicamente a este tema.

En la ceremonia de apertura, Stanley A. Plotkin, de 82 años, profesor emérito de la Universidad de Pensilvania y «padre» de algunas de las vacunas que utilizamos hoy de forma rutinaria, advirtió a la audiencia que el desarrollo de muchas de las vacunas no fue un camino de rosas; hubo que superar numerosos obstáculos e ir encadenando éxitos y fracasos. No obstante, a escala mundial, las vacunas preventivas han sido las intervenciones con una mejor relación coste-eficacia de la historia de la medicina. Basta recordar el éxito de las vacunas contra la viruela, la poliomielitis, la difteria, la rabia, el sarampión, la rubeola, la hepatitis B o el papilomavirus humano.

También en la ceremonia de apertura, Anthony S. Fauci, director del Instituto Nacional de Enfermedades Alérgicas e Infecciosas de EE.UU. (NIAID, por sus siglas en inglés), autor o coautor de la mayor parte de los avances que se han realizado en el campo del sida desde el año 1981, se preguntó si realmente resultaba necesaria una vacuna preventiva contra la enfermedad. Varias razones podrían hacer que la desestimáramos, entre ellas las dificultades que su desarrollo plantea y la existencia de otros mecanismos de prevención que, utilizados de forma combinada, están empezando a dar buenos resultados. Gracias a estas estrategias, en 2012 la tasa de nuevas infecciones por VIH a escala mundial se redujo más de un 20 por ciento respecto al año anterior. De hecho, hay modelos matemáticos que predicen que tales medidas podrían erradicar la epidemia ya hacia la mitad del siglo XXI. A pesar de ello, el experto argumentó a favor de las vacunas preventivas, porque los programas de prevención actuales que no se basan en ellas están sujetos a múltiples influencias económicas, sociales y políticas, y eventualmente se relajan o dejan de aplicarse, lo que conduce a un rebrote de la enfermedad. El aumento de la incidencia de la malaria en algunos países africanos ofrece un buen ejemplo de ello.



TRAS ADMINISTRAR a pacientes con sida una vacuna terapéutica (*rojo*) o un placebo (*azul*) e interrumpir el tratamiento antirretrovírico en la semana cero (*flecha*), se observa que los vacunados experimentan un menor rebrote de la carga vírica plasmática, aunque ningún paciente permanece con una carga vírica indetectable. (*Logaritmo en base 10.)

FUENTE: F. GARCÍA ET AL., *SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE*, VOL. 5, N.º 166, 2013

Obstáculos

En el caso de las vacunas preventivas contra el VIH nos enfrentamos con al menos tres retos muy difíciles de superar. El primero es que el VIH presenta una diversidad de formas y una mutabilidad sin precedentes, lo que explica su enorme capacidad para «escapar» de la presión del sistema inmunitario (como también de la acción de los fármacos antirretrovíricos). En segundo lugar, todavía no conocemos con precisión los correlatos de inmunoprotección en la enfermedad, esto es, las características que permiten proteger del VIH a una persona que entre en contacto con él. Y, en tercer lugar, por primera vez en la historia de las enfermedades infecciosas nos enfrentamos a un virus que tiene como objetivo el sistema inmunitario, el cual se supone que nos tiene que proteger.

No obstante, también se nos ofrecen algunas oportunidades favorables para el desarrollo de la vacuna. Una es la posibilidad de intervenir poco después del contagio; en concreto, en una ventana de unos pocos días en que el virus establece una «cabeza de puente» tras atravesar la mucosa vaginal o rectal antes de ser transportado hacia los ganglios linfáticos regionales, desde donde se disemina al resto del cuerpo. Por otro lado, podría resultar aceptable una vacuna «no esterilizante», es decir, que permitiera el establecimiento de la infección pero esta presentara una evolución atenuada. De hecho, durante la conferencia se expusieron dos estudios realizados con macacos en los que se emplearon virus de la familia herpes como vectores para introducir en los animales

moléculas del VIH. Ambos estudios demostraron que ese modelo es factible y muy eficaz.

Los ensayos

Los siete grandes ensayos clínicos realizados con humanos de 1987 a 2013 para examinar la eficacia de una vacuna preventiva contra el VIH han sido la historia de un fracaso (excepto el RV144, publicado en 2009). Pero, de los fracasos también se puede y se debe aprender. Los equipos responsables de esos ensayos —entre los que se incluye el nuestro— utilizamos como agentes que desencadenan respuesta inmunitaria (inmunógenos) proteínas del VIH (gp160 y gp120) o diversos genes del virus vehiculizados por vectores (adenovirus y ADN). Hubo respuesta a la vacuna pero la tasa de infecciones por VIH en los vacunados fue igual o incluso superior a la de los que habían recibido una sustancia inerte (placebo). Algunos de estos estudios fueron interrumpidos antes de acabar, a causa de un fenómeno que denominamos futilidad (imposibilidad estadística de demostrar la eficacia de un tratamiento con los datos preliminares de un análisis provisional).

El último de ellos, el estudio HVTN505 se presentó por primera vez en el congreso de Barcelona y sus resultados se publicaron el pasado octubre en el *New England Journal of Medicine*. La única nota de esperanza fue el llamado ensayo RV144, cuyos resultados se expusieron en el «AIDS Vaccine 2009» en París y se publicaron el mismo año en la revista antes mencionada. La vacuna era en realidad una combinación de dos inmunógenos: la proteína gp120 (que ya se había utilizado anteriormente de forma aislada sin éxito) y diversos genes del VIH vehiculizados por un vector denominado ALVAC (un poxvirus). Su capacidad de protección fue de solo el 31 por ciento, pero esta cifra fue notablemente superior a la del grupo que había recibido un placebo. La capacidad de protección se asoció con la producción de anticuerpos inmunoglobulina G (IgG) no neutralizantes contra las regiones V1/V2 de la envoltura del virus. Ello significa que los anticuerpos no son capaces de neutralizar directamente al virus pero sí de facilitar la citolisis de las células infectadas. Los pacientes vacunados que a pesar de ello se infectaron desarrollaron una enfermedad normal (no atenuada). Quizá la mayor virtud del estudio RV144 fue que volvió a poner encima de la mesa el papel de los anticuerpos (aunque fueran no neutralizantes) para el buen funcionamiento de una vacuna preventiva esterilizante.

Desde entonces se han identificado múltiples anticuerpos neutralizantes de amplio espectro en una pequeña proporción de personas infectadas por el VIH y dirigidos contra diversas regiones más o menos conservadas de la envoltura vírica. Su administración por perfusión o mediante terapia génica en animales de experimentación (ratones y monos) permite modificar la evolución de la infección. Con ello se ha abierto la puerta a la posibilidad de identificar y utilizar como inmunógenos para una potencial vacuna preventiva esterilizante aquellas regiones (péptidos, proteínas o incluso polisacáridos conjugados) de la envoltura del VIH contra las que van dirigidos estos anticuerpos.

En resumen, parece claro que una futura vacuna preventiva deberá combinar una doble estrategia: la estimulación de la inmunidad celular (la respuesta inmunitaria en la que participan los linfocitos T) y la producción de anticuerpos, ya que hasta ahora solo se centraba en uno de esos dos enfoques y ello puede explicar parte de los fracasos.

En nuestro programa de investigación de la vacuna del sida HIVACAT (acrónimo de HIV, Vacunas y Cataluña) estamos desarrollando dos inmunógenos. Uno es capaz de generar inmunidad celular en

ratones y monos; pronto se realizarán con él estudios en humanos. El segundo estimula la producción de anticuerpos en animales pequeños y habrá que ver si también lo hace en monos y en humanos. Combinados podrían convertirse en una excelente vacuna candidata, preventiva y a la vez esterilizante, con capacidad para modificar la evolución de la enfermedad en el caso de que se produjera una infección.

Coordinamos también un gran proyecto europeo encaminado a mejorar nuestras vacunas terapéuticas candidatas. A diferencia de las preventivas, que pretenden evitar la infección o, al menos, alterar el curso de la enfermedad cuando nos exponemos al virus, el objetivo de una vacuna terapéutica contra el VIH consiste en reducir la replicación del virus y evitar así la necesidad de tomar antirretrovíricos durante toda la vida [*véase* «Vacunas terapéuticas contra el VIH», por F. García Alcaide; Investigación y Ciencia, mayo de 2012]. En nuestros estudios incorporamos en la vacuna un adyuvante, una sustancia que potencia su efecto. El adyuvante se administra directamente en los ganglios linfáticos del paciente junto con un inmunógeno celular (una sustancia que estimula la inmunidad celular).

La conferencia de Barcelona se clausuró con el mensaje de que el desarrollo de una vacuna contra el VIH será una condición fundamental para lograr un mundo sin sida. Se ha demostrado que ambos tipos de vacunas, las preventivas y las terapéuticas, son posibles tanto en animales de experimentación como en el hombre. Pero las candidatas actuales, que no tienen problemas de seguridad ni de tolerancia, deberán optimizarse para aumentar su eficacia y ser viables para su utilización rutinaria en la práctica clínica.

—José M. Gatell
Jefe del Servicio de Infecciones y Sida del Hospital Clínico de Barcelona
Catedrático de medicina de la Universidad de Barcelona
Codirector del programa HIVACAT

ECOLOGÍA

Medir la vitalidad de los ríos

La velocidad de descomposición de la hojarasca constituye un buen indicador de la salud de los ecosistemas fluviales

Los ecosistemas que gozan de un buen estado de salud presentan una estructura y funcionamiento adecuados. En el caso de los ríos, la estructura hace referencia a aspectos como la calidad del agua, la forma del cauce, los márgenes y las riberas, y las comunidades biológicas que habitan estos medios. El funcionamiento, por otro lado, está basado en procesos ecológicos como la producción primaria, el reciclado de nutrientes o la retención y descomposición de materia orgánica. Tales procesos son a su vez la base de importantes servicios ecosistémicos (los recursos o procesos que benefician a los seres humanos): entre ellos, la capacidad de autodepuración de las aguas, el abastecimiento de agua potable o la producción de peces.

Existen numerosos métodos estandarizados para evaluar las propiedades estructurales de los ríos, pero pocos para valorar sus características funcionales. Por ello últimamente se trabaja en definir y poner a punto técnicas de evaluación del funcionamiento de los ríos. Una de las variables que más se está estudiando es la capacidad de descomponer hojarasca.

¿Por qué la hojarasca?

En los arroyos y ríos pequeños de las zonas forestales, la materia orgánica procedente de los bosques de las riberas constituye la base energética sobre la que se sustentan las comunidades de organismos acuáticos. Aunque esta materia orgánica es muy diversa (madera, hojas, flores, frutos, insectos, etcétera), las hojas representan el componente más importante por





CORTESÍA DE ARTURO ELOSEGI

LAS ACUMULACIONES DE HOJARASCA son la principal fuente de alimento de los invertebrados en los arroyos forestados (*izquierda*). Para conocer su velocidad de descomposición, se fijan bolsas rellenas de hojarasca a una barra en el cauce del río y se determina el peso de material que queda a lo largo del tiempo (*derecha*).

su abundancia y calidad como alimento. La cantidad y calidad de la hojarasca que ingresa en los ríos depende de la composición y densidad de la vegetación ribereña, y su distribución temporal, del tipo de bosque. En los bosques caducifolios la hojarasca cae fundamentalmente en otoño, mientras que en los perennifolios la caída se reparte de forma más homogénea a lo largo del año. Una vez en el agua, los restos vegetales pueden ser arrastrados río abajo o acumularse en el lecho fluvial, en función de la capacidad de retención del cauce. Por consiguiente, la disponibilidad de materia orgánica resulta altamente variable para los organismos que la consumen.

La descomposición de la hojarasca constituye un proceso complejo que conlleva la pérdida por lavado de sustancias solubles, la colonización de los restos por microorganismos, y la fragmentación y consumo por parte de invertebrados acuáticos. Las interacciones entre los distintos componentes revisten una enorme importancia. Aunque las hojas de algunas especies de árboles poseen una elevada calidad y pueden ser consumidas de manera inmediata por los detritívoros (organismos que se alimentan de detritos orgánicos), muchas suelen ser poco digeribles al estar compuestas en su mayoría de celulosa, lignina y otras sustancias resistentes a la descomposición. Las hojas van siendo colonizadas y cubiertas por hongos y bacterias, que asimilan nutrientes disueltos en el agua, como nitrógeno y fósforo, y los incorporan a estas. La hojarasca mejora así su calidad nutritiva y se convierte en un alimento más atractivo para sus consumidores. Por su parte, los invertebrados fragmentan la hojarasca y aumentan la superficie colonizable por microbios en un ciclo de retroalimentación positiva. Por todo ello, el conocimiento de la descomposición de la hojarasca proporciona una información clave acerca del funcionamiento global del ecosistema fluvial.

Descomposición variable

La velocidad de desintegración de la hojarasca es un parámetro fácil de determinar. Basta con encerrar una cantidad conocida en bolsas de malla, dejar estas en el río durante unas semanas, y determinar la masa que se ha perdido en ese tiempo. A menudo se combinan bolsas de malla gruesa (de 5 a 10 milímetros de luz de malla), que permiten la entrada de invertebrados, con otras de malla fina (de 200 a 500 micrómetros), donde solo actúan los microorganismos. De esta forma puede tenerse una idea de la contribución relativa de cada grupo de organismos a este proceso.

Para evaluar el funcionamiento de un tramo fluvial determinado necesitamos una idea aproximada de la velocidad a la que se debería descomponer la hojarasca en ausencia de impactos humanos. Para ello, se buscan estaciones de referencia, ríos poco modificados con características ambientales semejantes a los que queremos evaluar. El cociente entre la tasa de descomposición en un tramo determinado y la tasa de referencia podría servir como indicador del grado de alteración funcional. Dado que la vegetación de ribera depende, entre otros factores, de la región biogeográfica y del clima a los que pertenece, las estaciones de referencia deben seleccionarse atendiendo a estos criterios.

La descomposición de la hojarasca es un proceso sensible a varios factores: entre otros, la concentración de nutrientes en el agua, la presencia de compuestos tóxicos, la composición y abundancia de microorganismos e invertebrados, o las alteraciones en la vegetación de la cuenca. Tal sensibilidad hace del método una herramienta prometedora a la hora de evaluar el estado funcional de nuestros ríos. Sin embargo, su uso no está exento de dificultades, ya que el proceso de descomposición resulta variable en el tiempo y en el espacio. Además, al estar influido por tantos elementos de variación, a menudo es difícil encontrar la razón de una velocidad de descomposición anormalmente alta o baja. Hacen falta más investigaciones para convertir la medida de la descomposición en una técnica diagnóstica de rutina.

Nuestro grupo participó en uno de los trabajos sobre descomposición más extensos publicados hasta la fecha. El estudio, que apareció en *Science* en 2012, determinó la velocidad de descomposición de la hojarasca en 100 ríos de toda Europa que diferían en la concentración de nutrientes del agua en tres órdenes de magnitud. Los resultados revelaron un patrón claro: la descomposición es lenta en los ríos más limpios, con valores muy bajos de nutrientes, se acelera al aumentar estos, pero se vuelve a detener a partir de cierto nivel, ya que los contaminantes hacen desaparecer los grandes organismos fragmentadores.

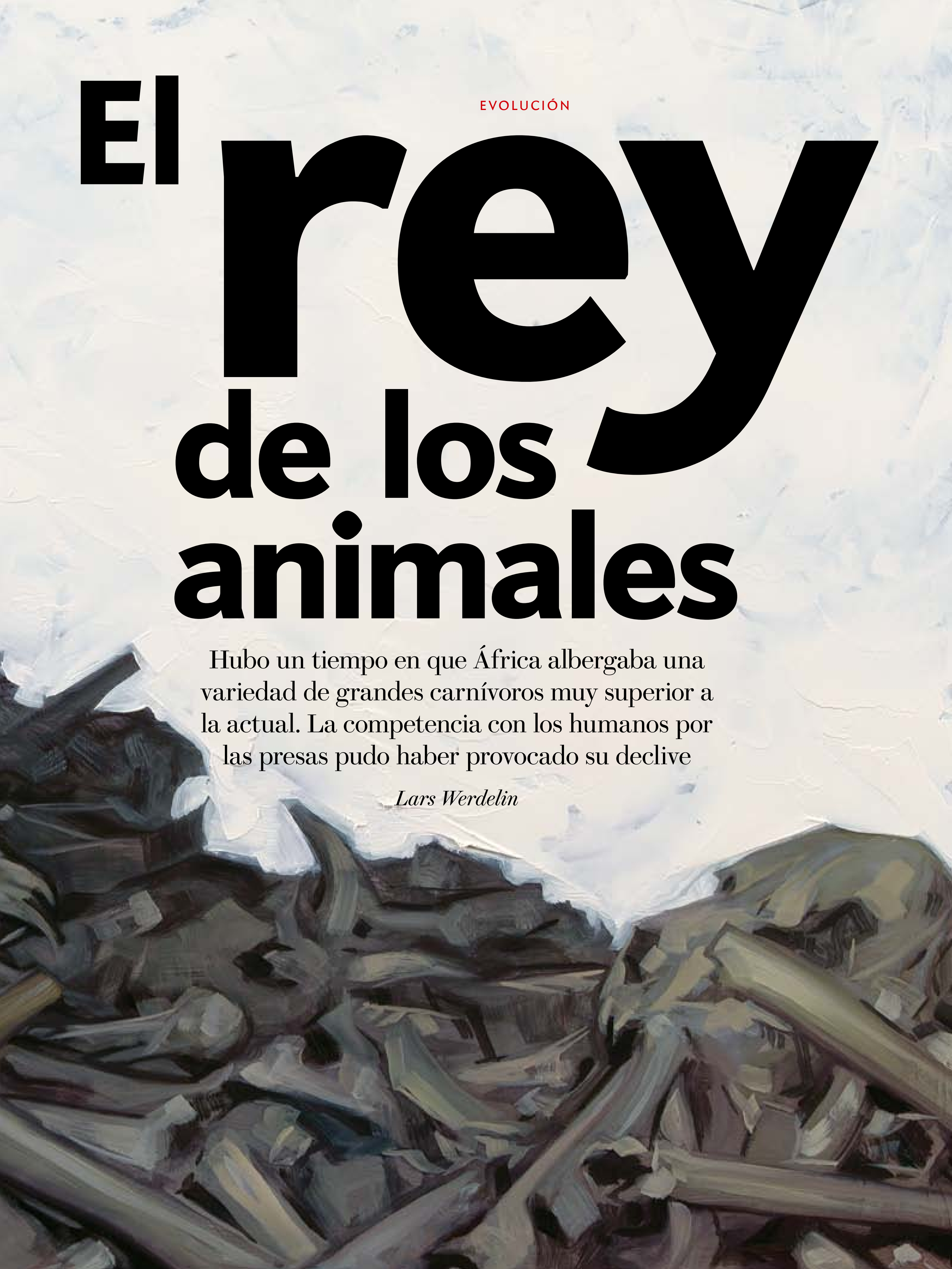
—Arturo Elosegi y Jesús Pozo
Facultad de ciencia y tecnología
Universidad del País Vasco



El rey de los animales

Hubo un tiempo en que África albergaba una variedad de grandes carnívoros muy superior a la actual. La competencia con los humanos por las presas pudo haber provocado su declive

Lars Werdelin



Lars Werdelin es conservador de fósiles de vertebrados en el Museo Sueco de Historia Natural de Estocolmo. Su investigación se centra en los carnívoros africanos y la relación entre su evolución y la de los humanos.



Amanece en el Serengeti

y la vida bulle en la sabana. Las cebras y los ñus pacen en la hierba húmeda, los elefantes y las jirafas mastican hojas de acacias y los leones y las hienas atisban el paisaje en busca de su próxima presa. Visitar este lugar es como viajar al pasado y ver el mundo en el que vivían nuestros antepasados hace millones de años, mucho antes de que los humanos empezasen a causar estragos en el planeta. Tal es la imagen que solemos tener del pasado. De hecho, nuestra idea de África oriental corresponde a la de un ecosistema prístino que no ha sido perturbado en los últimos dos millones de años desde que apareció el género *Homo*.

Pero las nuevas investigaciones ofrecen una imagen bastante distinta de este lugar supuestamente inalterado. Tras el análisis del registro fósil de los carnívoros africanos, nuestro grupo ha descubierto que los leones, hienas y otros grandes carnívoros que habitan hoy en África oriental solo representan una pequeña fracción de la diversidad que tuvo este grupo en el pasado. De forma enigmática, el declive de los carnívoros empezó en la misma época en que los primeros *Homo* comenzaron a consumir carne y a competir por ella con estos animales. Tal coincidencia de hechos señala que quizá los primeros humanos habrían contribuido a su extinción durante los últimos dos millones de años, mucho antes de que *Homo sapiens* entrase en escena.

La aparición de este nuevo consumidor de carne, así como la desaparición de grandes carnívoros, habrían causado enormes cambios en los niveles inferiores de la pirámide alimentaria, en concreto en las presas y las plantas que estas consumían. Hemos planteado la hipótesis de que nuestros ancestros empezaron a transformar por completo los ecosistemas mucho antes de lo que se imaginaba, en una época en que la población humana era muy reducida. Parece que el género *Homo* ha ejercido un impacto sobre la naturaleza desde su origen.

CARNÍVOROS EXTINTOS

Los fósiles de carnívoros (del orden Carnivora de los mamíferos) me han cautivado desde que, en la adolescencia, leí los libros del paleontólogo finlandés Björn Kurtén. En aquel entonces solo pensaba que eran divertidos y que cumplían una función esencial como reguladores de las poblaciones de herbívoros, las cuales crecerían exponencialmente si los predadores no los mantuvieran a raya. Pero cuando empecé a estudiar los fósiles de carnívoros de forma profesional, me di cuenta de cómo habían cambiado las relaciones entre esos animales y los humanos a lo largo de millones de años.

Durante las últimas dos décadas hemos estudiado miles de fósiles de África oriental y meridional con el objetivo de descubrir la forma en que las comunidades de carnívoros han evolucionado en los últimos siete millones de años. He llevado a cabo gran parte de esta investigación junto con Margaret E. Lewis, del Colegio Richard Stockton. Mientras que ella es experta en el estudio del esqueleto poscraneal, mi especialidad es el cráneo y la dentición. Nuestro trabajo nos ha ofrecido una visión mucho más precisa de la que disponíamos sobre los tipos de carnívoros que vivieron en África en ese intervalo de tiempo, el cual coincide con el período en que se produjo la evolución humana. A medida que íbamos acumulando datos, nos formamos una idea más clara sobre la aparición y extinción de diferentes especies y nos empezamos a dar cuenta de que el declive de los grandes carnívoros (los que pesan más de 21,5 kilogramos) coincidía con el momento en que nuestros antepasados pasaron de una dieta principalmente vegetariana a otra en la que abundaba la carne. Para nuestra sorpresa, parecía como si nuestros ancestros hubiesen contribuido a la extinción de esas especies.

Algunos yacimientos nos proporcionan pruebas de la transformación que han experimentado las comunidades de carnívoros africanos. Los primeros animales del período de siete millones de años no se asemejaban a los actuales. Los fósiles de los yacimientos de Lothagam y de la orilla occidental del lago Turkana, en Kenia, de entre 7,5 y 5 millones de años de anti-

EN SÍNTESIS

Hace millones de años, los grandes carnívoros africanos eran mucho más diversos que hoy, no solo en cuanto al número de especies existentes, sino a la diversidad de roles ecológicos que desempeñaban.

El estudio de los fósiles indica que el declive comenzó hace más de dos millones de años, cuando los primeros miembros de nuestro género, *Homo*, empezaron a consumir más carne.

Esta coincidencia temporal sugiere que la competencia con los humanos por las presas pudo haber causado la extinción de los grandes carnívoros, lo que habría conllevado varios cambios ecológicos.

PÁGINAS ANTERIORES: DAVID PALUMBO

güedad, correspondían a tigres de dientes de sable, hienas extrañas con largas extremidades, enormes osos-perro (carnívoros extintos de la familia de los Amphicyonidae que no eran ni cánidos ni úrsidos) y un mustélido (la familia a la que pertenecen los tejones) del tamaño de un leopardo. También prosperaban otros pequeños carnívoros emparentados con las actuales jinetas y mangostas.

Hace cuatro millones de años se unió al grupo un animal nuevo con una apariencia más familiar. En el yacimiento cercano de Kanapoi, todavía se identificaban dientes de sable y otras especies extintas, pero el carnívoro más común era una especie de hiena emparentada con la hiena parda que hoy vive en Sudáfrica. Si avanzamos unos pocos cientos de miles de años, la asociación de carnívoros resulta mucho más reconocible. En el yacimiento de Laetoli en el Serengeti, en Tanzania, famoso por el hallazgo de unas huellas de pisadas fósiles de homininos (los miembros de la familia a la que pertenecemos los humanos), se han recuperado fósiles de félidos similares a los actuales y de tigres de dientes de sable. También vivían las primeras hienas manchadas, algunas especies de cánidos, una gineta gigante y una variedad de pequeños carnívoros. En Hadar, en Etiopía, el yacimiento donde se descubrió el esqueleto de Lucy, de 3,2 millones de años de antigüedad, abundaban los restos de dientes de sable, hienas, cánidos y de unas nutrias gigantes sin equivalente en la actualidad.

Esos y otros yacimientos de hace entre 4 y 2,5 millones de años albergan conjuntos parecidos de fósiles. Cada uno posee una asociación de especies algo distinta, en función de las condiciones ambientales, pero todos presentan los mismos tipos de carnívoros. Así, aunque en todos hay hienas, la especie representada varía de un lugar a otro. Y aún más importante, en ningún yacimiento se observa que esos animales estuviesen perjudicados por la presencia de los homininos.

Después de su momento álgido, hace 3,5 millones de años, el número de grandes carnívoros decreció de forma gradual durante el siguiente millón y medio de años. Básicamente, porque se redujo el número de nuevas especies que aparecían mientras el ritmo de extinción se mantuvo constante. Pero, bajo una perspectiva global, los grandes carnívoros siguieron gozando de su supremacía durante ese período, al tiempo que nuestros pequeños e indefensos antepasados constituían meras presas. Sin embargo, la situación se trocaría en poco tiempo.

El registro fósil a partir de hace dos millones de años ofrece pruebas irrefutables de cambios en la composición de las comunidades de carnívoros. El ritmo de extinción aumentó y el de aparición de nuevas especies se mantuvo bajo, por lo que el número de especies de grandes carnívoros cayó en picado, sobre todo desde hace 1,5 millones de años en adelante. Y no solo desaparecieron especies, sino grupos enteros, como el de los dientes de sable. Esas criaturas del pasado se extinguían mientras que las especies modernas (los leones, leopardos y chacales que habitan hoy en día en África) los sustituían en unas asociaciones de carnívoros que nunca más volverían a ser tan diversas. Hace unos 300.000 años, todos los linajes de carnívoros arcaicos se habían desvanecido de África oriental y ya se habían establecido las comunidades actuales.

UN LOBO CON PIEL DE CORDERO

El patrón general que junto con Lewis habíamos observado en nuestros datos encajaba con la percepción que teníamos de la historia evolutiva de los carnívoros africanos. Confirmaba que en el pasado hubo una mayor variedad de especies que en el presente. Pero no habíamos previsto la brusca disminución que se produjo a partir de hace 1,5 millones de años. Esa pauta temporal nos llevó a sospechar de nuestros antepasados del género *Homo*.

Durante los primeros millones de años de la evolución humana, los homininos, con una capacidad craneal reducida y un tamaño corporal semejante al de los chimpancés, se alimentaban principalmente de productos de origen vegetal. Pero hace 1,5 millones de años apareció una nueva especie de hominino de mayor tamaño, más inteligente y dotada de una nueva tecnología. Se trataba de *Homo erectus* (en ocasiones denominado *Homo ergaster*), el primer miembro de la familia humana que se asemejaba a nosotros y el primero que empezó a consumir carne en grandes cantidades. Nos planteamos que la competencia con este nuevo depredador, que incorporaba en su dieta cada vez más proteínas animales procedentes de grandes herbívoros, quizá pudiese explicar el declive de los carnívoros.

Parecía un razonamiento acertado, pero la cronología de los eventos no encajaba. Si echábamos la culpa a la competencia con *H. erectus*, entonces la reducción de grandes carnívoros debería haber sucedido hace más de 1,5 millones de años, ya que *H. erectus* apareció en África hace unos 1,9 millones de años. Estudiar solo el número de especies para conocer la evolución de un orden completo de mamíferos tiene sus limitaciones, ya que una disminución de ese número en un grupo puede estar enmascarada por un aumento en otro. De este modo, si dos especies de dientes de sable se extinguen pero son reemplazadas por leones y leopardos, la cifra total de especies se mantiene, pero la comunidad ha cambiado mucho porque los últimos pueden capturar un abanico más amplio de presas que los primeros.

Se me ocurrió entonces que una mejor manera de comprender por qué habían desaparecido los grandes carnívoros consistía en determinar no solo cuántas especies había en un momento dado del pasado, sino cuál era la diversidad de su nicho ecológico. Los carnívoros son muy diferentes en su hábitat y forma de subsistir. Por ejemplo, los félidos están muy adaptados a comer casi solo carne y se les puede calificar de hipercarnívoros. Pero otros carnívoros, como los cánidos, presentan una dieta más omnívora y, además de carne, consumen una mayor variedad de alimentos. En el otro extremo se hallan especies como los mapaches, hipocarnívoros, que ingieren poca carne y se alimentan sobre todo de frutos y otros vegetales.

Decidimos basarnos en el trabajo realizado por mi antigua estudiante de doctorado Gina D. Wesley-Hunt, hoy en el Colegio Montgomery, que había investigado la evolución de los carnívoros en América del Norte durante los últimos 60 millones de años. En su estudio, Wesley-Hunt había identificado una serie de rasgos relacionados con la función de las mandíbulas y los dientes. A partir de estas características, había cuantificado las diferencias entre las especies de una comunidad en cuanto a los tipos de carne que comían y, por consiguiente, a los nichos ecológicos que ocupaban. Mediante el esquema de rasgos que ella había desarrollado para identificar la función de las mandíbulas y los dientes (esto es, el tipo de alimento para los que estaban adaptados), codificamos esos rasgos en 78 especies de carnívoros (29 de gran tamaño y 49 de tamaño reducido) del registro fósil africano de los últimos 3,5 millones de años. El análisis de los datos permitía saber cómo habían cambiado a lo largo del tiempo los diferentes tipos de carnívoros con distintos nichos ecológicos en una comunidad.

Para visualizar la diversidad de formas e inferir las preferencias de dieta de estos animales fósiles, realizamos un estudio estadístico de los datos codificados y creamos un gráfico bi-

dimensional para mostrar lo que hemos denominado morfoespacio. Este representa la diversidad de formas (y, por tanto, de funciones) que existe en un determinado grupo de organismos, en este caso de los carnívoros que habitaron en África en los últimos 3,5 millones de años. Si trazamos y comparamos los diferentes morfoespacios de los carnívoros que vivieron en distintos períodos, podemos comprender cómo ha cambiado su anatomía y sus hábitos alimentarios a lo largo del tiempo.

Los resultados fueron reveladores. Junto con Lewis publicamos en marzo de 2013 un artículo en la revista *PLOS ONE* en el que concluíamos que los grandes carnívoros que hoy viven en África oriental solo ocupan una pequeña parte (menos del 1,5 por ciento) del morfoespacio de los que vivían hace entre 3,5 y 3 millones de años, momento en que alcanzaron su máxima diversidad. El grupo perdió casi el 99 por ciento de su «riqueza funcional», es decir, los carnívoros actuales ocupan muchos menos nichos ecológicos que sus predecesores. De hecho, la riqueza funcional empezó a disminuir hace entre 2 y 1,5 millones de años, lo que significa que el proceso habría empezado antes. El inicio más remoto del declive de los carnívoros encajaba mejor con el origen de *H. erectus*. Aunque nuestro trabajo se centraba en el este de África, los grandes carnívoros actuales son los mismos en todo el continente. Así, es probable que la pérdida de riqueza funcional observada en esta región sea representativa de lo que sucedió en todos los carnívoros africanos.

La actividad de los humanos no es la única causa posible del declive de los carnívoros. Los cambios climáticos han provocado variaciones en la fauna del continente durante los últimos millones de años. Por tanto, en este caso debe contemplarse también que el clima haya afectado al número de especies. Sin embargo, los estudios de los carnívoros actuales sugieren que el clima ha ejercido una escasa influencia en la riqueza funcional de sus comunidades. A diferencia de los herbívoros, que dependen de la distribución de los vegetales de los que se nutren, los cuales sí están muy determinados por el clima, los carnívoros son bastante insensibles a los cambios climáticos y ambientales. De hecho, si el clima fuese el responsable, los pequeños carnívoros también habrían disminuido, pero no sucedió así. La diversidad de especies y la riqueza funcional de estos se ha mantenido constante a lo largo de los últimos 3,5 millones de años e incluso podría haber aumentado.

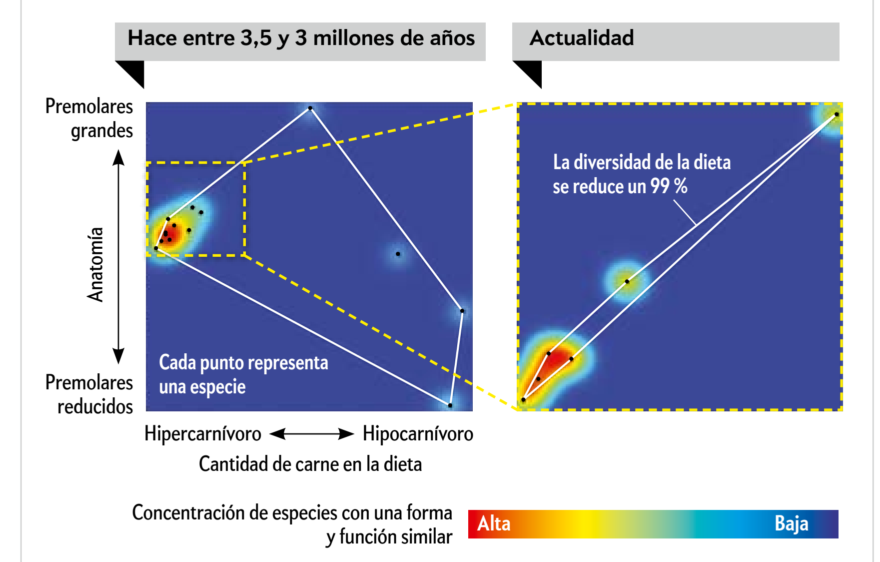
Para saber si la actividad humana ha contribuido a la extinción de los carnívoros resultaría útil conocer la importancia de la carne en la dieta de los primeros *Homo*. Durante mucho tiempo los arqueólogos han debatido sobre esta cuestión. Algunos opinan que la carne y la caza eran factores cruciales; otros piensan que constituía una parte marginal de la dieta y los homininos solo carroñeaban lo poco que otros dejaban. Todos suelen concordar en que *Homo* empezó a incorporar más proteínas de origen animal (quizá también pescado y marisco) hace entre 2 y 1,5 millones de años, durante el Pleistoceno inferior.

El antropólogo Henry Bunn, de la Universidad de Wisconsin en Madison, explica que la evolución hacia una dieta más carnívora pudo producirse en tres fases; estas encajarían con la idea de que la competencia con los primeros homininos llevó a la extinción de numerosos grandes carnívoros. En un principio, los homininos cortaban a veces la carne con útiles de piedra bastante primitivos o lascas con filos producidos de forma natural. En esta etapa, que Bunn sitúa hace entre 2,6 y 2,5 millones de años, el registro arqueológico indica que tenían una capacidad limitada de obtener carne. En la segunda etapa tal capacidad aumentó; además, rompían los huesos para extraer la médula y transportaban las partes de los animales ricas en carne a los lugares donde vivían. Bunn estima que los homininos alcanzaron este estadio hace entre 2,3 y 1,9 millones de años y que en esa época consu-

HALLAZGOS

Una sombra de lo que fueron

El análisis de los fósiles de mamíferos carnívoros africanos de los últimos siete millones de años muestra que los grandes miembros de este grupo han disminuido drásticamente tanto en número de especies como en una característica que se denomina riqueza funcional (que expresa la diversidad de su alimentación). La comunidad de grandes carnívoros del pasado presentaba especies adaptadas a comer principalmente alimentos de origen vegetal (hipocarnívoros) y otras que consumían sobre todo carne (hipercarnívoros). En la actualidad, solo sobreviven algunos hipercarnívoros. El momento de su declive coincide con el origen de *Homo erectus*, el primer ancestro de los humanos que incorporó cantidades notables de carne en su dieta. Ello sugiere que la competencia con los humanos por el acceso a las presas llevó a muchos grandes carnívoros a la extinción.



Pruebas de la pérdida de diversidad

La disminución de la diversidad de los carnívoros se observa al representar en un gráfico el desarrollo de los dientes premolares (un indicador de cómo se obtienen los alimentos y la fuerza con que se mastican) frente a la proporción de carne en la dieta (inferida a partir de rasgos de las mandíbulas y dientes). Cada punto corresponde a una especie de un determinado intervalo de tiempo, y cada polígono abarca todas las especies en cada uno de los períodos. Si comparamos el área de los polígonos, vemos que los grandes carnívoros han perdido casi el 99 por ciento de la diversidad de la dieta que tenían en su momento álgido, hace entre 3,5 y 3 millones de años, antes de la aparición de *Homo*.

DE «TEMPORAL CHANGE IN FUNCTIONAL RICHNESS AND EVENNESS IN THE EASTERN AFRICAN PLIO-PLEISTOCENE CARNIVORAN GUILD», POR LARS WERDELIN Y MARGARET E. LEWIS, EN *PLOS ONE*, VOL. 8, N.º 3, 6 DE MARZO DE 2013

mían carne de forma más regular gracias al carroñeo y tal vez la caza. En la tercera fase, los homininos aprovechaban la carne de los animales de forma más sistemática; eran los primeros en acceder a los cuerpos de las presas, ya que poseían mayor capacidad para arrebatárselas a otros carnívoros o quizá porque ya cazaban de forma regular. Bunn data esta etapa hace entre 1,8 y 1,6 millones de años.

Aunque carecían de dientes y garras letales, así como de la fuerza física de los dientes de sable y otros grandes carnívoros, los homininos compensaron esas deficiencias con su inteligencia, cada vez más desarrollada, y la cooperación social. Y en épocas de escasez ganaban terreno a los carnívoros, sobre todo a los hipercarnívoros (como los dientes de sable), ya que al ser omnívoros podían consumir otro tipo de alimentos en el momento en que no había suficiente carne. La ventaja competitiva de los homininos resultaba más aparente durante las estaciones más duras del año. (El hecho de que los grandes carnívoros que quedan hoy en día sean todos hipercarnívoros refleja que al inicio estos superaban a los omnívoros y a los hipocarnívoros.)

La aparición de este nuevo consumidor de carne y el declive de los grandes carnívoros habrían causado enormes cambios en los niveles inferiores de la pirámide alimentaria

ALIMENTO PARA EL CEREBRO

Al igual que todas las hipótesis novedosas, esta viene acompañada de una serie de problemas que requieren una solución. El más notable consiste en establecer la cronología de los hechos que hemos descrito, tanto el momento en que se inició el declive de los carnívoros como aquel en que los humanos empezaron a competir con ellos. Se desconoce si los homininos eran suficientemente numerosos y competitivos como para provocar ese cambio tan importante en ellos.

Precisar cuándo comenzaron a menguar requiere el descubrimiento de más fósiles del intervalo entre 2,5 y 2 millones de años o el uso de técnicas más refinadas en el análisis de los fósiles que ya tenemos. En la actualidad, estamos trabajando en el desarrollo de estas técnicas. Podemos afirmar con toda seguridad que el declive de los carnívoros se había iniciado hace al menos 1,8 millones de años, mientras que el método más avanzado existente indica que se produjo hace algo más de dos millones de años. Sin embargo, no está claro si esos datos encajarán exactamente con los eventos evolutivos de los homininos. Aunque el esquema temporal propuesto por Bunn resulta compatible con el escenario que hemos presentado, las ideas de este han sido cuestionadas por otros. Algunos investigadores piensan que las dos primeras etapas sucedieron mucho después de lo que él plantea.

Quizá nunca podamos resolver el interrogante sobre el tamaño de la población de los homininos y de su capacidad competitiva. Por ahora, su explicación constituye una mera cuestión de opinión. Sin duda, presentaban una baja densidad de población, pero no sabemos hasta qué punto. Podría generarse una serie de simulaciones de las dos variables, partiendo de valores razonables de ambas, para ver si esta hipótesis resulta viable. Pero quizá nunca podremos obtener datos de cuántos homininos había alrededor de una presa ni qué posibilidades tenían estos de apoderarse de ella antes de que lo hiciera un diente de sable. Sin embargo, la ausencia de tales datos no demuestra que nuestra hipótesis sea falsa.

Esperamos que los investigadores escépticos aporten nuevas formas ingeniosas para analizarla. Al respecto, vale la pena destacar otro aspecto de esta idea. En general, los intentos para explicar alteraciones en los ecosistemas ofrecen una perspectiva que va de abajo arriba; es decir, observan cómo los factores climáticos afectan a las plantas y cómo los cambios en ellas influyen en el resto de la cadena alimentaria hasta llegar a los grandes depredadores. Nuestra hipótesis sobre la evolución de los grandes carnívoros en África oriental proporciona una visión de arriba abajo; considera que las modificaciones en los principales depredadores se habrían propagado hasta los productores primarios, como las hierbas y los árboles, en la parte inferior de la cadena alimentaria.

La reintroducción de los lobos en el Parque Nacional de Yellowstone y el efecto que tienen sobre los herbívoros que viven allí y, por extensión, en la vegetación del parque, ofrece un impresionante ejemplo del impacto que puede ejercer un cambio entre los depredadores. Al volverse más abundantes los lobos, disminuyó el número de alces, lo que a su vez redujo la presión de estos sobre el crecimiento de las plantas; como consecuencia, en los lugares donde antes proliferaban los herbívoros, la vegetación se volvió más exuberante.

La entrada de los primeros *Homo* en el nicho de los carnívoros en África podría haber desencadenado una alteración aún más drástica en el ecosistema que la sucedida en Yellowstone. Mientras que los lobos habían formado parte del ecosistema natural de este parque, lo que significa que las otras especies quizá conservaban algunas adaptaciones a su presencia, los primeros *Homo* carecían de tales precedentes. Cabría esperar que la llegada del nuevo depredador habría tenido mayores consecuencias para el ecosistema que la reintroducción de uno que ya había estado presente en él inicialmente. Quizás entonces, la causa de la desaparición de los carnívoros no debamos buscarla en los restos de nuestros antepasados homininos ni en los de los grandes carnívoros, sino entre los de herbívoros y plantas cuyo mundo se transformó cuando *Homo* desarrolló el gusto por la carne.

PARA SABER MÁS

Patterns of change in the Plio-Pleistocene carnivorans of eastern Africa: Implications for hominin evolution. Margaret E. Lewis y Lars Werdelin en *Hominin Environments in the East African Pliocene: An Assessment of the Faunal Evidence*. Springer Verlag, 2007.

Temporal change in functional richness and evenness in the eastern African Plio-Pleistocene carnivoran guild. Lars Werdelin y Margaret E. Lewis en *PLOS ONE*, vol. 8, n.º 3, págs. 1-11, marzo de 2013.

ASTRONOMÍA

MUNDOS CON DOS SOLES

Ya se han descubierto varios planetas en torno a y maravillosos, muy



sistemas estelares binarios. Se trata de mundos extraños diferentes de cualquiera de los planetas del sistema solar

William F. Welsh y Laurance R. Doyle

Si los ocasos terrestres le parecen bellos, imagine uno en el que dos estrellas de diferente color proyectasen sombras anaranjadas y rojizas.



William F. Welsh es catedrático de astronomía en la Universidad de San Diego.

Laurance R. Doyle es astrofísico del Instituto SETI de Mountain View, en California.

Durante años, los dos autores de este artículo nos hemos preguntado si los sistemas estelares binarios, aquellos formados por dos estrellas cercanas, podrían sustentar planetas. ¿Realmente existirían mundos como Tatooine, el planeta de *La guerra de las galaxias* cuyo cielo era iluminado por dos soles?

Aunque había buenas razones para suponer la existencia de tales mundos, algunos teóricos lo ponían en duda. Tal vez el entorno de un sistema compuesto por una pareja de estrellas resultase demasiado caótico para permitir la formación de planetas. A diferencia de un cuerpo que orbita alrededor de una estrella aislada, un planeta en un sistema binario tendría que competir con dos campos gravitatorios. Además, dichas fuerzas experimentarían constantes cambios, ya que las estrellas de un sistema binario no permanecen fijas, sino que orbitan una en torno a la otra. E incluso si llegara a formarse un planeta, su estabilidad a largo plazo no estaría asegurada: podría acabar expulsado hacia el espacio profundo o colisionando contra una de las estrellas. El comportamiento de algunos sistemas de estelares dobles parecía sugerir indirectamente la existencia de planetas circumbinarios; sin embargo, aún faltaba una prueba directa.

En marzo de 2009, tras más de dos décadas de trabajo por parte del investigador de la NASA William Borucki y sus colaboradores, la agencia lanzó al espacio un excelente instrumento cazador de exoplanetas: el telescopio Kepler. Desde entonces, la misión ha descubierto miles de candidatos a exoplanetas gracias al método de los tránsitos, una técnica consistente en detectar los pequeños eclipses que provoca un planeta cuando pasa por delante de su estrella anfitriona. Dos años después de su lanzamiento, sin embargo, aún no se había detectado ningún planeta circumbinario. Esa frustrante falta de indicios comenzó a hacer mella. En la primavera de 2011, durante una de las conferencias telefónicas semanales de la misión Kepler, uno de nosotros profirió un comentario de pretendido humor negro: «Quizá deberíamos escribir un artículo explicando por qué no existen». Se hizo el silencio.

Nuestros temores resultaron excesivos. Seis meses después, celebramos una rueda de prensa para anunciar el primer tránsito de un planeta circumbinario. Fue bautizado como Kepler-16b. Al cabo de unos meses, el grupo de trabajo de eclipses binarios de la misión Kepler halló dos más, Kepler 34-b y Kepler 35-b. Con ello quedaba demostrado que, si bien se trataba de objetos exóticos, no eran tan poco frecuentes como habíamos pensado. Con ello quedaba establecida una nueva clase de sistema planetario. Hasta hoy, la misión Kepler ha descubierto siete planetas circumbinarios, una cifra que bien podría doblarse dentro de poco. De hecho, varios cálculos sugieren que la Vía Láctea debería albergar decenas de millones de ellos.

ESTRATEGIAS DE BÚSQUEDA

La búsqueda de planetas circumbinarios comenzó en la década de los ochenta, antes incluso de que apareciesen las primeras pruebas firmes sobre la existencia de planetas más allá del sistema solar [*véase* «Sombras de otras Tierras», por Laurance R. Doyle, Hans-Jörg Deeg y Timothy M. Brown; Investigación y Ciencia, noviembre de 2000]. Aunque los tránsitos en un sistema binario podían resultar muy complejos, la esperanza de observarlos se fundaba en una sencilla expectativa: si un planeta

EN SÍNTESIS

Los sistemas estelares binarios abundan en nuestra galaxia. Desde hace tiempo, los astrónomos se vienen preguntando si podrían albergar planetas.

Algunos teóricos pensaban que el entorno de un sistema compuesto por dos estrellas sería demasiado caótico para permitir la formación de planetas.

En fecha reciente se han detectado los primeros tránsitos de planetas circumbinarios. Dos de ellos se encuentran en la franja de habitabilidad.

ILUSTRACIONES DE RON MILLER

TAXONOMÍA SIDERAL

Dos tipos de planetas binarios

Existen varias clases de sistemas formados por dos estrellas. En ocasiones, los astros describen grandes órbitas alrededor de su centro de masas común, con períodos orbitales de cientos de años. En tal caso, se comportan casi como si estuvieran aisladas. Los planetas de tipo S son aquellos que solo orbitan en torno a una de ellas, por lo que prácticamente no sienten la influencia de la otra.

Cuando dos estrellas se hallan muy próximas, sus períodos orbitales pueden durar semanas o incluso días. Dado que su entorno resulta muy caótico, los astrónomos se preguntaban si existirían planetas de tipo S, aquellos que orbitan alrededor de la pareja.

orbitaba en torno a un sistema binario de estrellas eclipsantes, cabía esperar que su movimiento tuviese lugar en el mismo plano orbital que el de las estrellas. En otras palabras: si, vistas desde la Tierra, una estrella eclipsaba a la otra, entonces sería mucho más probable que el planeta transitase por delante de una de ellas o incluso ambas. Eso presuponía que el planeta y las estrellas tendrían órbitas coplanares, una hipótesis razonable y que podía ponerse a prueba.

Por varios motivos, las estrellas binarias eclipsantes constituyen uno de los fundamentos sobre los que se construye la astrofísica estelar. Su particular orientación con respecto a la línea de visión desde la Tierra hace que los astros pasen uno por delante del otro, lo que bloquea parte de la luz del que queda detrás. Si se modeliza con precisión la manera en que disminuye su brillo durante uno de esos eclipses, puede deducirse el tamaño y la forma de cada estrella, así como la geometría de sus órbitas. Junto con otras medidas, ello permite averiguar sus respectivos radios y masas. Los sistemas binarios eclipsantes proporcionan así una calibración fundamental de los radios y las masas estelares. Después, estos pueden usarse para estimar las propiedades de estrellas aisladas y las de otros sistemas binarios no eclipsantes.

Si las estrellas que componen un sistema binario se encuentran muy alejadas una de otra (con un período orbital de, pongamos por caso, cientos de años), se comportarán de modo muy similar a como lo harían si estuviesen aisladas. Un planeta podrá orbitar en torno a una de ellas y, en general, no se verá muy afectado por la otra. Tales planetas reciben el nombre de circunestelares, o de tipo S. Durante la pasada década se han descubierto docenas de ellos.

La situación gana interés cuando ambas estrellas se encuentran tan próximas entre sí que apenas tardan semanas o días en completar una órbita. En tal caso, para que la trayectoria de un planeta se mantenga estable, este debe orbitar alrededor de los dos astros a la vez. Además, los cálculos numéricos muestran que la distancia media entre el planeta y el sistema binario debe superar cierto valor crítico. Si el objeto se halla demasiado cerca de las estrellas, estas acabarán engulléndolo o expulsándolo al espacio exterior. La separación mínima que garantiza la estabilidad asciende a unas dos o tres veces la distancia que media entre las estrellas. Estos planetas se denominan circumbinarios, o de tipo P. Aunque los planetas que orbitan en torno a estrellas aisladas o muy separadas de su compañera resultan bastante frecuentes, nos preguntábamos si la naturaleza permitiría la existencia de planetas circumbinarios.

En un sistema compuesto por un planeta y una única estrella, los tránsitos se suceden con una periodicidad metronómica, lo cual facilita sobremanera su detección. Pero, si se añade otra estrella, el sistema de tres cuerpos comenzará a mostrar toda clase de efectos complejos. Ello se debe a que, al contrario de lo que ocurre con un sistema simple (en el que la estrella anfitriona puede considerarse en reposo), en un sistema binario los astros se mueven con rapidez. De hecho, si la distancia entre ambas estrellas es menor que la que las separa del planeta, aquellas se moverán más deprisa que este, tal y como se sigue de una de las famosas leyes de Kepler. Por tanto, el planeta transitará por

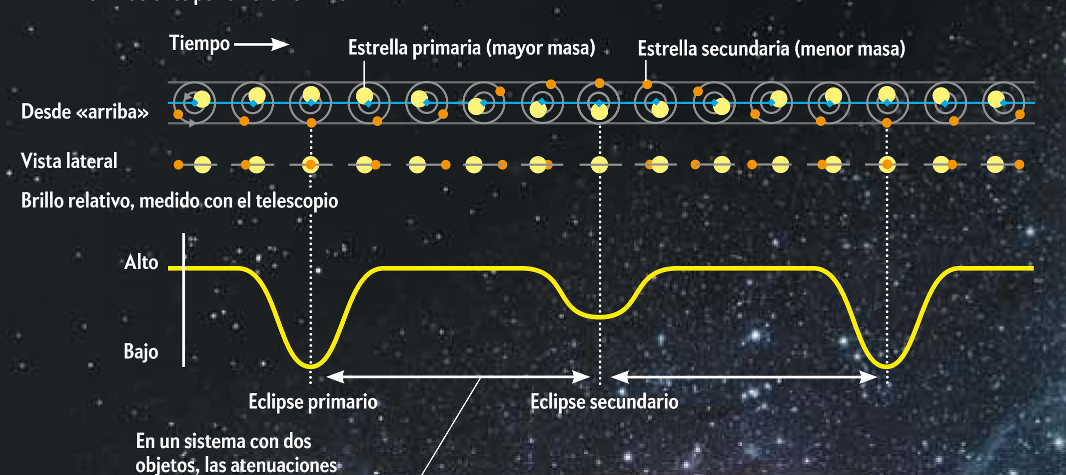
¿Cómo encontrar planetas circumbinarios?

Los sistemas estelares binarios constituyen laboratorios únicos. Si, vistas desde la Tierra, las dos estrellas se eclipsan mutuamente, puede extraerse gran cantidad de información sobre sus propiedades a partir de la magnitud y cadencia de los eclipses. Estos también permiten inferir la existencia de planetas cercanos. Sin embargo, la cinemática de un sistema formado por tres cuerpos puede resultar muy compleja. Estos esquemas representan una versión idealizada de los efectos que buscan los astrónomos.

Sistemas estelares binarios

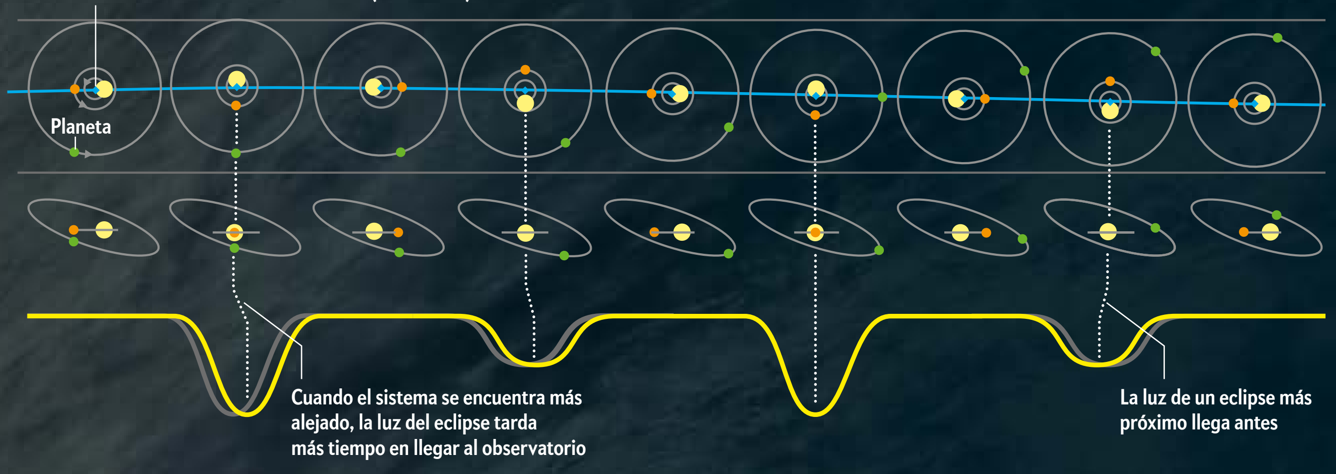
Las ilustraciones no se encuentran a escala

En un sistema binario eclipsante, cada estrella bloquea de manera periódica la luz de su compañera, lo que provoca disminuciones periódicas de brillo.



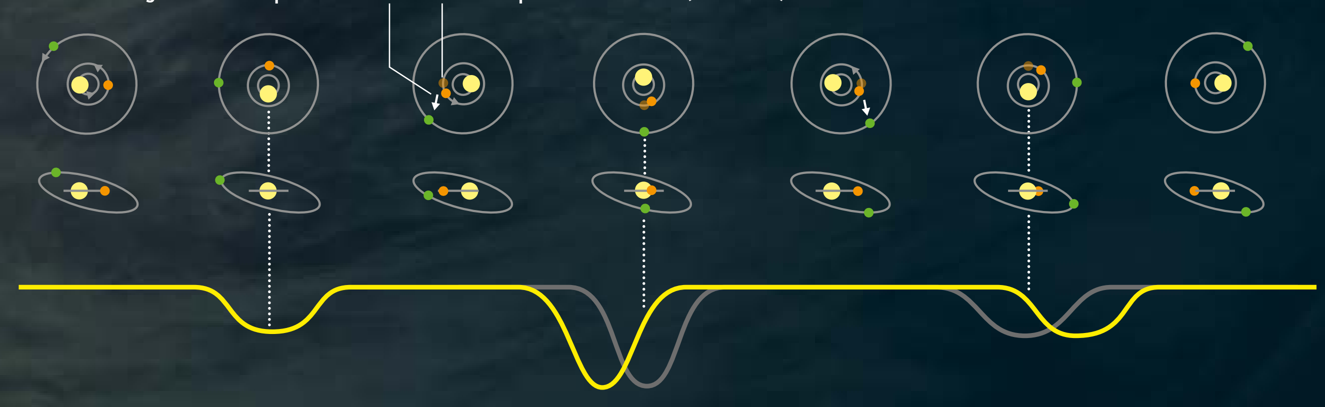
Efecto en el tiempo de llegada de la luz

En un sistema con un planeta circumbinario, el centro de masas de las dos estrellas orbita alrededor del centro de masas total. Como consecuencia, las estrellas se acercan y alejan periódicamente de nuestro planeta. Cuando se hallan más distantes, la luz del eclipse binario tarda más tiempo en llegar a los telescopios terrestres, lo que provocará un ligero retraso. Cuando se encuentran más cerca, el eclipse se adelanta.



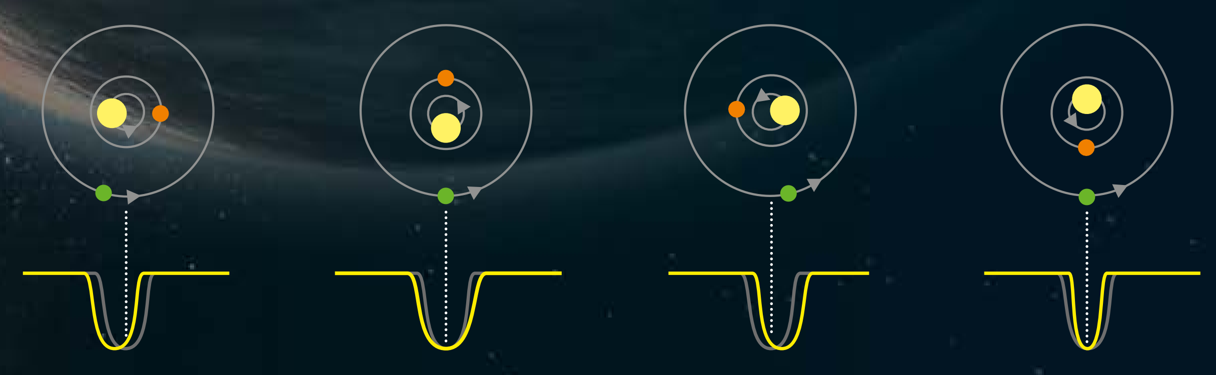
Efecto dinámico

Si el planeta orbita a menor distancia de las estrellas, afectará al movimiento de una de ellas o al de ambas. Además, si una de las estrellas es menos masiva que la otra, su órbita se aproximará más a la del planeta, lo que amplificará el efecto. Esos acercamientos pueden modificar las órbitas del sistema de dos cuerpos de un modo complejo. En este ejemplo, la atracción gravitatoria del planeta sobre la estrella secundaria provoca que el eclipse primario se adelante y que el secundario se atrase.



Tránsitos planetarios en estrellas binarias

Si un planeta pasa por delante de una estrella, bloqueará parte de la luz del astro. En un sistema circumbinario, las estrellas se mueven, por lo que en unas ocasiones el planeta transitará con antelación y, en otras, lo hará con retraso. Además, si el planeta y la estrella avanzan en un mismo sentido, el tránsito durará más tiempo; si lo hacen en sentidos opuestos, su duración será menor. Este efecto puede provocar retrasos de días o incluso mayores.



RON MILLER (*ilustración*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

delante de un sistema binario cuyas componentes se agitan a gran velocidad; en unas ocasiones lo cruzará antes y en otras se demorará.

Aunque predecibles (si se conocen las masas y las órbitas), tales tránsitos no se sucederán de manera regular. Además, la duración de cada uno dependerá del movimiento relativo del planeta con respecto a la estrella que se encuentra detrás. Cuando ambos avancen en el mismo sentido, el tránsito tendrá una duración mayor; si lo hacen en sentidos opuestos, será más breve. Aunque semejantes variaciones dificultan la detección de planetas circumbinarios, suponen al mismo tiempo una ventaja: una vez descifrada la órbita del sistema binario, el patrón de sucesión de tránsitos y la duración de cada uno puede emplearse para confirmar la presencia de un cuerpo circumbinario. Ningún otro fenómeno astronómico presenta tales pautas, por lo que estas proporcionan una señal inequívoca.

LA PRIMERA DETECCIÓN

Hasta la desafortunada aparición de ciertos problemas técnicos a mediados de 2013 [*véase* «La segunda vida de Kepler», por Clara Moskowitz; Investigación y Ciencia, diciembre de 2013], la misión Kepler había centrado su atención en una sola zona del cielo. Al buscar ligeras disminuciones de brillo en las estrellas que observaba, la misión Kepler no solo halló exoplanetas, sino también más de 2000 nuevos sistemas binarios eclipsantes. Además, se descubrieron varias configuraciones exóticas, como el primer sistema eclipsante triple.

En 2011, uno de nosotros (Doyle), junto con Robert Slawson, del Instituto SETI en Mountain View, observó eclipses adicionales en el sistema binario KIC 12644769. Sus dos estrellas se eclipsaban mutuamente cada 41 días; sin embargo, se detectaron otras tres disminuciones de brillo que carecían de explicación. Entre las dos primeras mediaron 230 días, pero la siguiente sucedió 221 días después; es decir, nueve días antes de lo esperado. Justamente la huella que cabía esperar de un planeta circumbinario.

Esos tránsitos parecían delatar la existencia de un tercer cuerpo. Sin embargo, este no tenía por qué ser un planeta: podía tratarse de una estrella tenue y diminuta. La misión Kepler había demostrado que los sistemas eclipsantes triples tampoco eran tan excepcionales. El oscurecimiento se mostraba muy leve, por lo que debía tratarse de un astro de poco tamaño. Pero algunos objetos de tipo estelar, como las enanas marrones, presentan también dimensiones reducidas. No podíamos confirmar que el avistamiento correspondiese a un planeta. Para asegurarnos, teníamos que medir su masa.

En un sistema de tres cuerpos en el que solo se ven dos, el tercero puede revelar su presencia de dos maneras. Imagine dos estrellas eclipsantes y un planeta relativamente grande orbitando a su alrededor. Cada estrella gira en torno a la otra; pero, además, su centro de masas orbita alrededor del centro de masas de los tres cuerpos (*véase el recuadro* «¿Cómo encontrar planetas circumbinarios?»). Por tanto, en ocasiones la pareja de estrellas se acercará ligeramente a la Tierra, mientras que en otras se alejará. Cuando su distancia a nosotros sea mayor, la luz tardará más tiempo en alcanzarnos y los eclipses se observarán con cierto retraso; en caso contrario, se adelantarán. Dicho cambio resultará tanto más apreciable cuanto mayor sea la masa del tercer cuerpo. Ese efecto cíclico permite deducir la existencia de un objeto invisible y estimar su masa. Además, cuanto más lejos se encuentre el tercer cuerpo del sistema binario, mayor será el efecto y más durará el ciclo. En nuestro sistema candidato a poseer un planeta circumbinario, sin embargo, no se observaba ningún cambio cíclico del orden de 230 días. Ello implicaba que el cuerpo oculto tenía poca masa. Pero ¿cuánta?

La otra manera en que un tercer cuerpo puede afectar al sistema binario recibe el nombre de «efecto dinámico» y obedece a la interacción gravitatoria directa entre los objetos. Si estos se encuentran a poca distancia, dicho efecto domina sobre el primero. El compañero oculto altera de forma leve las órbitas de las estrellas, lo que provoca cambios en el ritmo con que se suceden los eclipses. Dado que es la menor de las dos estrellas la que más se aproxima al tercer cuerpo, su órbita se verá perturbada en mayor medida. A diferencia de las variaciones relacionadas con el tiempo que tarda en llegar la luz, el efecto dinámico altera la cadencia de los eclipses de un modo complejo.

Uno de nuestros colaboradores en el equipo científico de la misión Kepler, Daniel C. Fabrycky, ahora en la Universidad de Chicago, advirtió que un objeto de masa estelar modificaría de manera notable el ritmo de los eclipses. Un planeta, en cambio, induciría una señal mucho más sutil. En nuestro caso, los efectos dinámicos tenían que dominar sobre las variaciones debidas al tiempo de viaje de la luz. Tras analizar los datos con detalle, comprobamos que los cambios en la secuencia temporal de los eclipses no se correspondían en absoluto con la que cabía esperar de un compañero de masa estelar.

La apoteósica conclusión llegó cuando Joshua A. Carter, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, completó una simulación por ordenador. Su resultado reproducía las observaciones a la perfección si el tercer cuerpo se identificaba con un planeta de masa similar a la de Saturno. El excelente acuerdo entre los datos empíricos y el modelo demostraba, pues, la existencia de un planeta circumbinario. Además, proporcionaba valores muy precisos de los radios, las masas y las características orbitales del sistema.

El nuevo astro, el primer planeta circumbinario observado en un tránsito, fue bautizado Kepler 16-b. La combinación de los tránsitos y los indudables efectos dinámicos no arrojaba ninguna duda. Dado que, vistas desde Kepler 16-b, las estrellas exhibirían un diámetro aparente similar al de nuestro disco solar, el planeta adquirió el sobrenombre de Tatooine, en homenaje a la icónica puesta de sol doble del planeta ficticio de *La guerra de las galaxias*. La ciencia ficción se había convertido en ciencia.

UN NUEVO TIPO DE PLANETA

Al principio, Kepler 16-b nos pareció muy peculiar. El radio de su órbita se hallaba peligrosamente cerca del límite mínimo requerido para la estabilidad, al que solo superaba en un 9 por ciento. Dado que, por aquella época, Kepler 16-b era el único planeta circumbinario conocido que transitase, nos preguntábamos si no se trataría más bien un accidente de la naturaleza.

La respuesta llegó con rapidez. Junto con Jerome A. Orosz, de la Universidad de San Diego, habíamos estado buscando planetas circumbinarios que no transitasen. Estos debían abundar mucho más, ya que su órbita no necesitaría guardar ninguna orientación especial con respecto a la línea de visión desde la Tierra. Y, por las mismas razones que explicábamos arriba, su presencia debería inducir pequeños efectos sobre la cadencia de los eclipses estelares. Hacía meses que nos habíamos decantado por esa línea de investigación, por lo que ya contábamos con algunos candidatos. Entonces, la tarde de un martes de agosto de 2012, uno de nosotros (Welsh) observó tránsitos en uno de esos sistemas binarios. En apenas unas horas, Fabrycky ya tenía un modelo informático que reproducía la cadencia variable de los

tránsitos y su duración, gracias a lo cual pudo confirmar que el objeto en tránsito se correspondía con un nuevo planeta: Kepler 34-b. Tras una labor febril, Orosz halló al día siguiente nuevos tránsitos en otro sistema binario eclipsante, lo que condujo al descubrimiento de Kepler 35-b.

Durante los meses siguientes, Orosz halló un nuevo planeta, Kepler-38b. Con una masa similar a la de Neptuno, este dejó patente la existencia de planetas circumbinarios algo menores. Más tarde, el descubrimiento del sistema planetario Kepler-47, con al menos dos cuerpos, puso de manifiesto que las estrellas binarias también podían albergar varios planetas a la vez. El último planeta circumbinario descubierto, Kepler-64b (también conocido como PH1), fue hallado de manera independiente por el estudiante de doctorado Veselin Kostov, de la Universidad de Johns Hopkins, y por astrónomos aficionados del proyecto Planet Hunters («Cazadores de Planetas»). Este pertenece a un sistema de estrellas cuádruple, lo que ejemplifica la diversidad de entornos en los que pueden surgir planetas.

Los planetas circumbinarios descubiertos hasta ahora indican que tales objetos no son tan excepcionales. Por cada planeta en tránsito detectado, las consideraciones geométricas nos permiten concluir que debería haber entre cinco y diez que simplemente no vemos porque la orientación de su órbita con respecto a la Tierra no nos lo permite. Dado que el análisis de unos mil sistemas estelares binarios condujo al descubrimiento de siete planetas, podemos concluir que, con una estimación conservadora, nuestra galaxia debería albergar decenas de millones de ellos.

El hecho de que existan planetas tan cercanos a un entorno caótico demuestra que su génesis constituye un proceso vigoroso y robusto

Todos los planetas circumbinarios en tránsito hallados hasta ahora por Kepler son gigantes gaseosos: mundos carentes de la corteza rocosa que permitiría a un astronauta permanecer en su superficie y disfrutar de un ocaso con dos soles. La búsqueda de objetos rocosos y más pequeños continúa, si bien detectar planetas circumbinarios semejantes a la Tierra resultará extraordinariamente difícil.

Pero, incluso con una muestra tan reducida, ya podemos plantearnos varias preguntas. En torno al 50 por ciento de los sistemas estelares binarios eclipsantes detectados por Kepler exhiben un período orbital inferior a 2,7 días. Por tanto, esperaríamos que la mitad de los sistemas binarios que albergan planetas compartiesen dicha característica. Sin embargo, el período orbital más corto de todos los observados asciende a 7,4 días. ¿Por qué? Al respecto, conjeturamos que tal vez exista una relación con el proceso que provocó que las dos estrellas se acercasen tanto.

Además, los planetas avistados tienden a orbitar muy cerca de sus estrellas; tanto que, de hallarse mucho más próximos, serían inestables. ¿A qué se debe esta peculiaridad? Descubrir por qué los planetas circumbinarios describen órbitas tan próximas al valor crítico de inestabilidad nos ayudará a mejorar las teorías de formación planetaria y a averiguar cómo evolucionan sus órbitas en el tiempo. Aunque ignoramos la razón por la que estos planetas parecen preferir órbitas cortas, podemos extraer una conclusión de gran relevancia: el hecho de que existan planetas tan cercanos a un entorno caótico muestra que su génesis constituye un proceso vigoroso y robusto.

UNA ZONA HABITABLE DINÁMICA

La propensión de los planetas circumbinarios hallados por Kepler a situarse tan cerca del radio crítico de estabilidad tiene una consecuencia muy interesante. En las estrellas observadas por Kepler, el radio crítico se encuentra por lo general cerca de la zona habitable, la región donde la temperatura permite que el agua perdure en estado líquido. Si un planeta orbita demasiado próximo a una estrella, el agua solo podrá existir en estado gaseoso; si lo hace muy alejado, únicamente podrá albergar hielo. Por lo que sabemos, el agua líquida constituye un requisito indispensable para que emerja la vida tal y como la conocemos.

En el caso de una estrella aislada, la zona habitable corresponde a una corona esférica alrededor del astro. En un sistema binario, cada componente cuenta con su propia franja de habitabilidad. Si las estrellas se encuentran muy próximas, como ocurre con los planetas circumbinarios detectados por Kepler, esa zona se convierte en un esferoide deformado. Dado que los dos astros orbitan uno en torno al otro, la zona habitable combinada gira con ellos. Y debido a que las estrellas se mueven más deprisa que el planeta, su zona habitable se desplazará a mayor velocidad que este.

A diferencia de la Tierra, que sigue una órbita casi circular alrededor del Sol, la distancia de un planeta circumbinario a cada una de sus estrellas anfitrionas puede sufrir grandes variaciones durante el período orbital. Por ello, las estaciones podrían fluctuar en apenas unas semanas. Tales cambios meteorológicos serían de gran calado y, tal vez, solo parcialmente regulares. «Una experiencia salvaje», como lo describe Orosz.

Dos de los siete planetas circumbinarios mencionados se encuentran en la franja de habitabilidad de su sistema estelar: un porcentaje notable. Que un planeta se halle en la zona habitable no garantiza que en él se den las condiciones necesarias para la vida (la Luna, sin ir más lejos, se encuentra en la franja de habitabilidad del Sol, pero su pequeña masa no le permite retener una atmósfera). Con todo, la alta proporción de planetas circumbinarios en la zona habitable hace que resulte inevitable plantearse algunas preguntas. Con estaciones tan rigurosas y cambiantes, ¿cómo sería la vida, y acaso una civilización, en un mundo con dos soles?

PARA SABER MÁS

Kepler-16: A transiting circumbinary planet. Laurance R. Doyle et al. en *Science*, vol. 333, págs. 1602-1606, septiembre de 2011.

Transiting circumbinary planets Kepler-34b and Kepler-35b. William F. Welsh et al. en *Nature*, vol. 481, págs. 475-479, enero de 2012.

Kepler-47: A transiting circumbinary multiplanet system. Jerome A. Orosz y otros en *Science*, vol. 337, págs. 1511-1514, septiembre de 2012.

La misión Kepler: **kepler.nasa.gov**

Planet Hunters (proyecto colaborativo dedicado a la búsqueda de planetas): **www.planethunters.org**

BIOLOGÍA

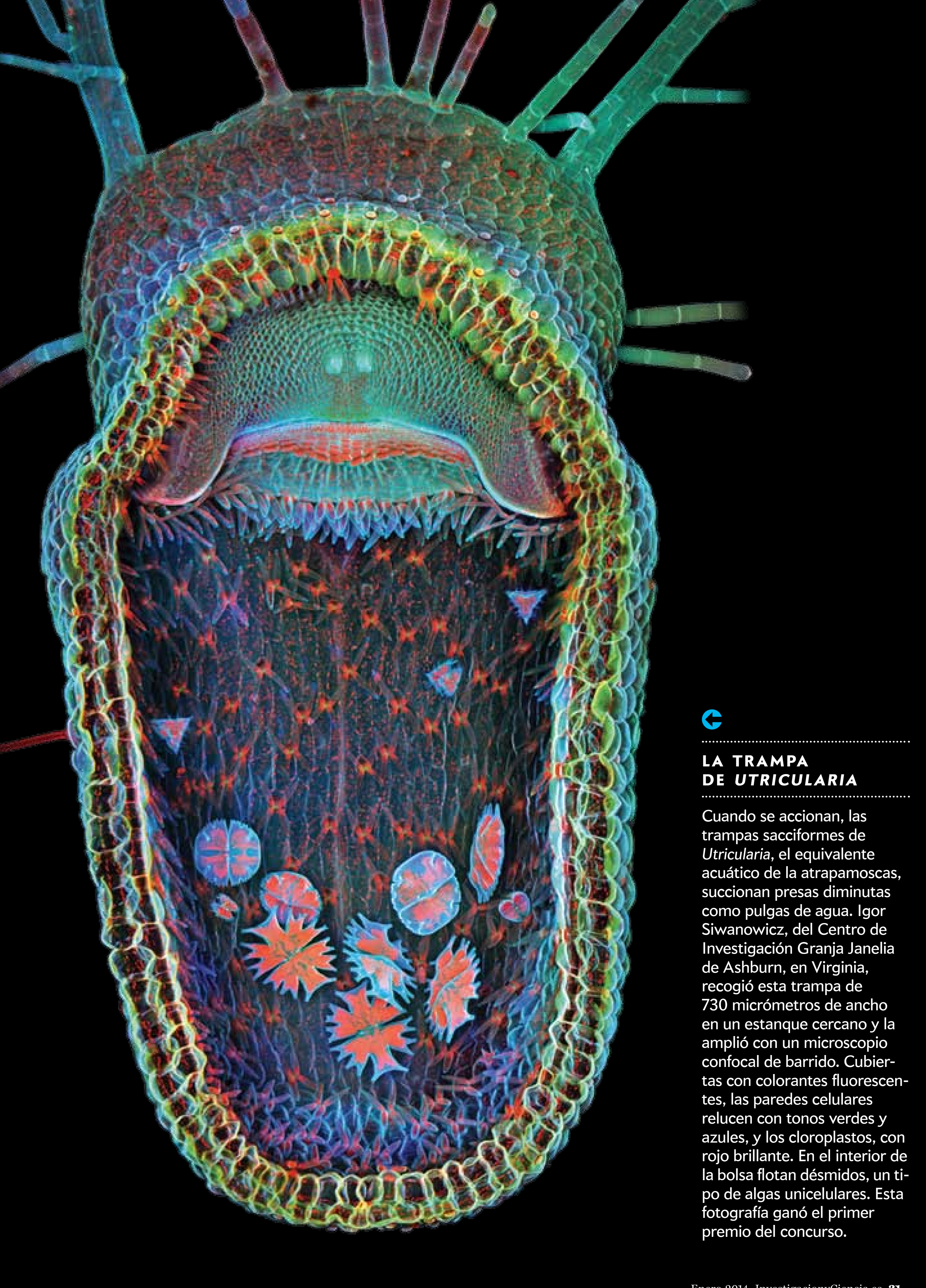
LA VIDA BAJO UNA LENTE

Los microscopios transforman el modo en que vemos y entendemos la vida en nuestro planeta

Ferris Jabr

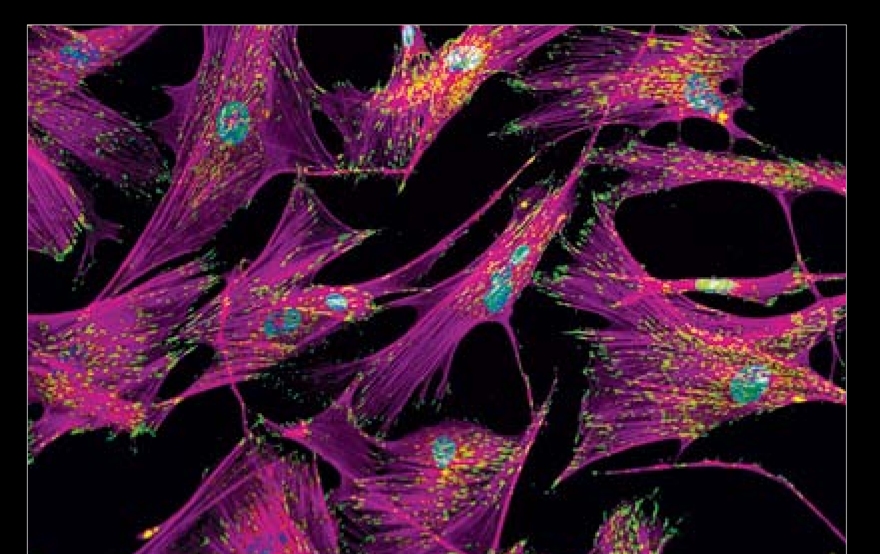
EN EL SIGLO XIX, EL POETA INGLÉS WILLIAM BLAKE DESAFIABA A SUS LECTORES A «VER un mundo en un grano de arena» en un célebre poema. ¿Qué habría dicho si hubiera podido mirar a través de un microscopio actual? Gracias a la potencia de la óptica moderna, sabemos que bajo la cutícula de una hoja, en el seno de una mota de polvo y en nuestra sangre y nuestros huesos existe un cosmos de maravillas que a simple vista resultan invisibles. Fotografías asombrosas de los animales más minúsculos y de los rasgos más ínfimos de los mayores seres vivos han inspirado algunos de los cambios más trascendentales en nuestra percepción de la vida en la Tierra.

A lo largo de las páginas siguientes presentamos una selección de fotografías captadas por científicos, fotógrafos profesionales y aficionados premiadas el mes pasado en el concurso de imágenes digitales de biopaisajes de 2013, organizado por Olympus. Las fotografías nos zambullen en la trampa subacuática que tiende una planta carnívora, abren una ventana al desarrollo de un embrión de murciélago, revelan las minúsculas caras que se esconden en el tronco de una palmera y desvelan los sorprendentes detalles de un hueso de dinosaurio transformado en un cristal reluciente.



LA TRAMPA DE *UTRICULARIA*

Cuando se accionan, las trampas sacciformes de *Utricularia*, el equivalente acuático de la atrapamoscas, succionan presas diminutas como pulgas de agua. Igor Siwanowicz, del Centro de Investigación Granja Janelia de Ashburn, en Virginia, recogió esta trampa de 730 micrómetros de ancho en un estanque cercano y la amplió con un microscopio confocal de barrido. Cubiertas con colorantes fluorescentes, las paredes celulares relucen con tonos verdes y azules, y los cloroplastos, con rojo brillante. En el interior de la bolsa flotan désmidos, un tipo de algas unicelulares. Esta fotografía ganó el primer premio del concurso.





CÉLULAS PULMONARES

En lugar de extraer las células madre de embriones humanos, algunos investigadores revierten las células adultas a un estado de inmadurez a partir del cual pueden convertirse en células de múltiples tipos de tejidos. En esta imagen de Ankur Singh, de la Universidad Cornell, un grupo de células pulmonares humanas de unos 130 micrómetros de largo están experimentando esa transformación. Anticuerpos fijados a proteínas fluorescentes tiñen de verde la vinculina (proteína que facilita el anclaje de las células a las superficies) y de violeta las fibras de actina, responsables de modelar la morfología de la célula. Los núcleos aparecen coloreados de azul.



PALMERA

Cualquiera que corte el tronco de una palmera *Syagrus comosa* en secciones y las examine bajo el microscopio no podrá evitar sentirse a su vez observado. David Maitland de Norfolk, Inglaterra, fotografió este antiguo corte transversal, probablemente preparado y teñido a principios del siglo XX. Los haces vasculares por los que circulan los líquidos, azúcares y demás nutrientes de la planta guardan un parecido inquietante con máscaras de calaveras. Las «cuencas oculares» son conductos de xilema que transportan agua. Las máscaras miden unos 620 micrómetros desde la coronilla hasta el mentón.







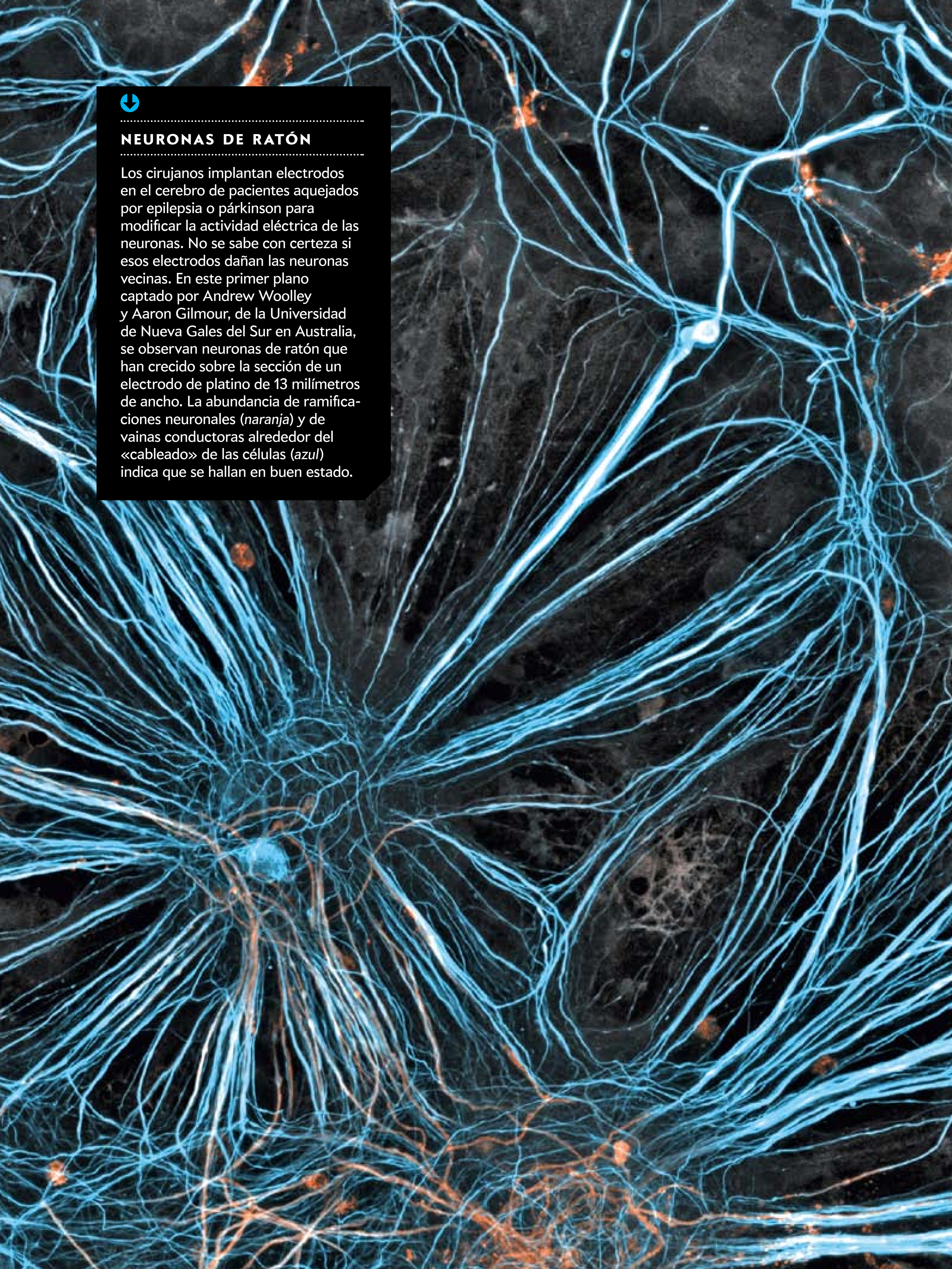
HUESO DE DINOSAURIO

Douglas Moore colocó bajo un microscopio estereoscópico una lámina de hueso de dinosaurio de 150 millones de años de antigüedad, del tamaño de la palma de la mano, para examinar su estructura esponjosa (*blanco*), mostrada aquí a 32 aumentos. Las burbujas rojas corresponden a óxido de hierro mezclado con una variedad cristalina de sílice llamada ágata, el mineral que hace de las geodas y la madera petrificada objetos tan coloridos. A través de un proceso químico que ha desconcertado a los geólogos durante siglos, la sílice reaccionó con el hueso y convirtió el espécimen entero en un ágata.



EMBRIÓN DE MURCIÉLAGO

Este murciélago, *Molossus rufus*, tan pequeño como la goma de borrar de un lápiz, quedó conservado con una mezcla de sales y ácidos con un gesto de esconder el rostro. La embrióloga Dorit Hockman, de la Universidad de Oxford, explica que a medida que las alas crecen las envuelve sobre sí. Hockman tomó la fotografía como parte de sus investigaciones sobre los huesos del antebrazo; presentes en todos los vertebrados, engendran tanto el armazón flexible del ala membranosa como la pequeña garra de un ratón.



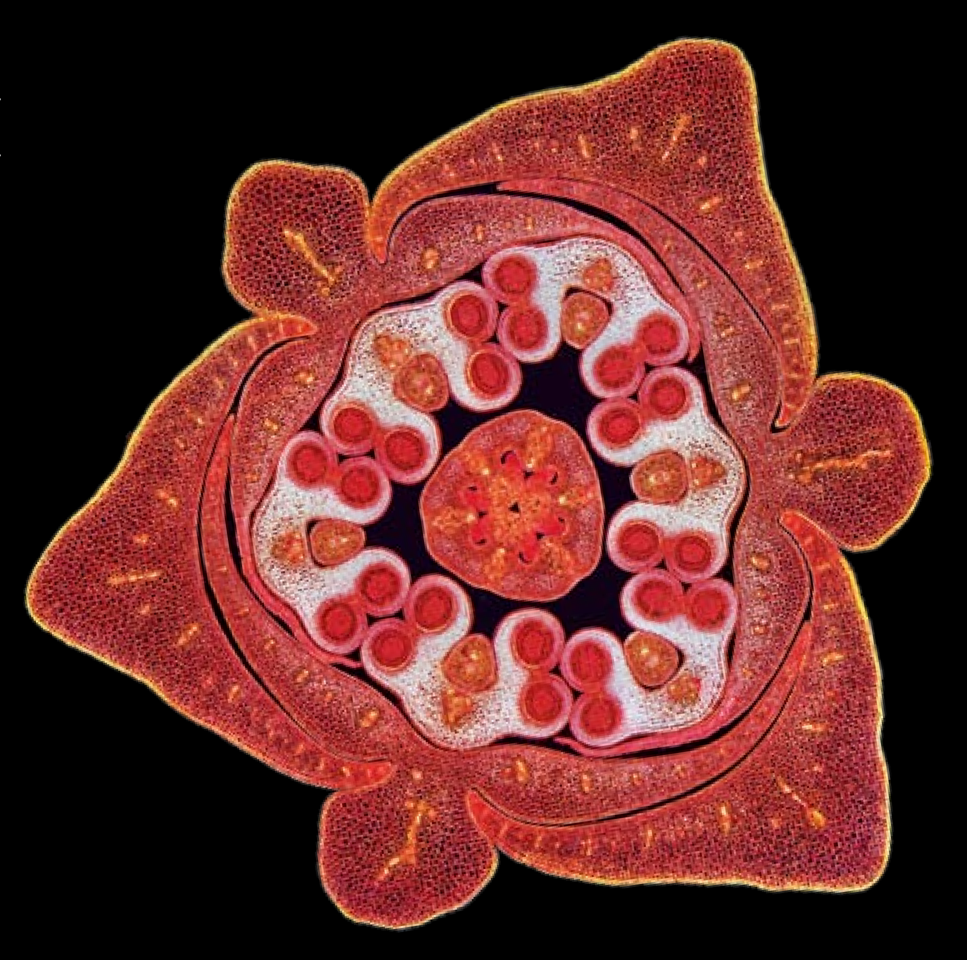
NEURONAS DE RATÓN

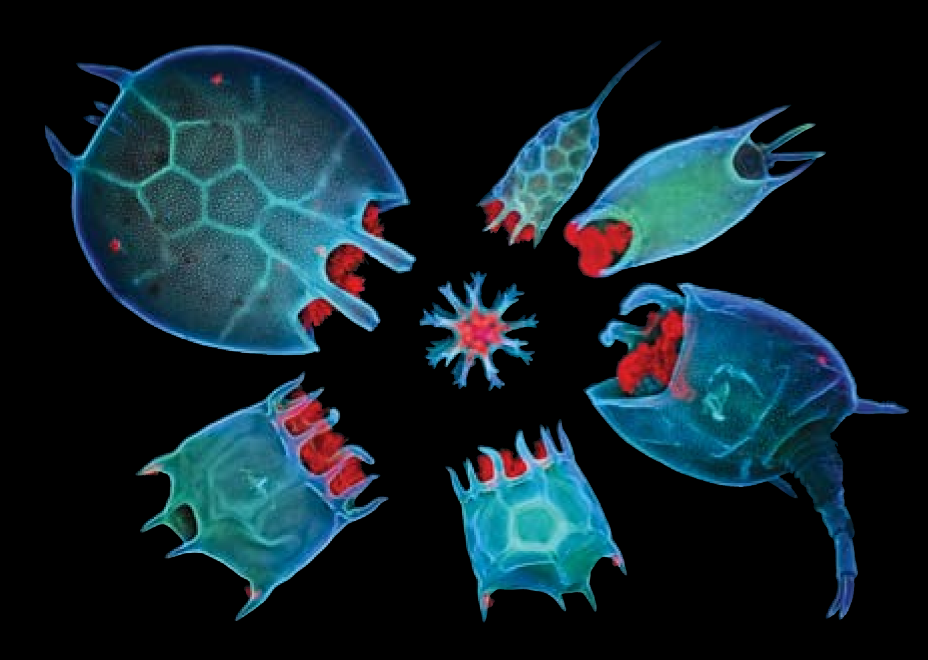
Los cirujanos implantan electrodos en el cerebro de pacientes aquejados por epilepsia o párkinson para modificar la actividad eléctrica de las neuronas. No se sabe con certeza si esos electrodos dañan las neuronas vecinas. En este primer plano captado por Andrew Woolley y Aaron Gilmour, de la Universidad de Nueva Gales del Sur en Australia, se observan neuronas de ratón que han crecido sobre la sección de un electrodo de platino de 13 milímetros de ancho. La abundancia de ramificaciones neuronales (*naranja*) y de vainas conductoras alrededor del «cableado» de las células (*azul*) indica que se hallan en buen estado.



YEMA DE LIRIO

Spike Walker, de Penkridge, en Inglaterra, fotografió una antigua preparación que contenía este corte transversal de la yema floral de un lirio, del diámetro de un dedo de la mano; cree que la planta se tiñó con rojo de safranina. Como todas las plantas con flor de la clase de las monocotiledóneas, las partes del lirio se hallan en número de tres. Los carpelos de la flor, que engendran las semillas, ocupan el centro, rodeados por las anteras cargadas de polen, envueltas a su vez por tres pétalos y tres grandes sépalos protectores.





ROTÍFEROS

Seis diminutos animales acuáticos llamados rotíferos rodean un désmido fotosintético; el mayor apenas alcanza los 205 micrómetros de ancho (*superior izquierda*). Siwanowicz cubrió la quitina del duro exoesqueleto de estos animalillos con un colorante fluorescente que emite luz azul cuando es iluminado por el láser del microscopio confocal. Un colorante rojo recubre los cilios, estructuras filiformes y cortas que ayudan a capturar el alimento y nadar. La clorofila de los désmidos adquiere un brillo rojo cuando incide sobre ella la luz de ciertas longitudes de onda.

Ferris Jabr

PARA SABER MÁS

Concurso de imágenes digitales de biopaisajes de Olympus: **www.OlympusBioScapes.com**

EN NUESTRO ARCHIVO

Iluminar lo minúsculo. Gary Stix en *IyC*, febrero de 2010.
Vida invisible. Davide Castelvecchi en *IyC*, febrero de 2011.
Miniaturas deslumbrantes. Gary Stix en *IyC*, febrero de 2012.
Maravillas diminutas. Kate Wong en *IyC*, marzo de 2013.

CLIMA

Una solución al carbono



integral

¿Y si explotáramos los yacimientos de salmuera rica en metano y su energía se emplease para secuestrar carbono?

Steven L. Bryant



EN SÍNTESIS

Una manera de reducir las emisiones de carbono sería capturarlo antes de que se incorporase a la atmósfera y enterrarlo a grandes profundidades. Sin embargo, debido a su elevado coste, la mayoría de los países no lo llevan a cabo.

Una posibilidad consistiría en extraer salmuera caliente del subsuelo, inyectar en ella CO_2 y volver a enterrarla. El proceso permitiría aprovechar la energía geotérmica del fluido y también extraer el metano disuelto.

Dicho ciclo resultaría económica y energéticamente rentable. La salmuera contenida en la costa del Golfo de EE.UU. permitiría almacenar una sexta parte de las emisiones del país y cubrir un sexto de su demanda de gas natural al año.

Steven L. Bryant es catedrático de ingeniería del petróleo y sistemas geológicos en la Universidad de Texas en Austin, donde dirige el Centro para las Fronteras de la Seguridad Energética Subsuperficial, así como un programa de investigación financiado por la industria. Ambos proyectos se centran en el almacenamiento geológico de dióxido de carbono.



Se cuenta que Mark Twain dijo una vez que, aunque todo el mundo se queja del tiempo, nadie hace nada al respecto. Un Mark Twain moderno tal vez observase que todo el mundo habla del cambio climático, pero que nadie adopta medidas firmes. Una de las razones principales es económica. Reducir la acumulación atmosférica de dióxido de carbono —el principal factor humano responsable del calentamiento— implicaría un oneroso abandono del carbón y el petróleo como fuentes principales de energía. Una alternativa consistiría en capturar el CO_2 emitido por la industria y almacenarlo en un lugar donde pudiese permanecer durante siglos. Sin embargo, la tecnología necesaria para ello implica también grandes costes.

Pero ¿y si fuese rentable hacer ambas cosas a la vez: producir enormes cantidades de energía y reducir las emisiones? ¿Y qué ocurriría si la tecnología necesaria para ello se ajustase a la infraestructura industrial ya existente? Tal situación podría tornarse realidad en la costa del Golfo estadounidense. Debido a sus peculiares características geológicas, dicha región resulta apta para enterrar ingentes cantidades de CO_2 disuelto en salmuera caliente a varios kilómetros de profundidad. Al mismo tiempo, ese almacenamiento generaría un gran volumen de metano, el cual podría emplearse como combustible, así como calor para consumo doméstico. Por sí mismos, ni el almacenamiento de CO_2 ni la producción de metano o de energía geotérmica son rentables. Sin embargo, algunos cálculos recientes demuestran que, combinados, dichos procesos reportarían buenos resultados tanto en EE.UU. como en otros países.

LA LEY DE LA GRAVEDAD

¿Metano? ¿Uno de los peores responsables del cambio climático? ¿El gas que puede fugarse en las zonas donde se han efectuado fracturaciones hidráulicas y cuya potencia de calentamiento resulta, molécula por molécula, 20 veces superior a la del CO_2? En efecto, metano.

Para entender la idea, consideremos primero el proceso de captura y enterramiento, o «secuestro», de carbono. Fue pensar en tales objetivos lo que, junto con mis colaboradores, nos llevó a formular una propuesta aparentemente herética.

El secuestro de carbono consiste en atrapar el CO_2 allí donde se emite (lugares como las chimeneas de una central de combustibles fósiles) y apartarlo antes de que se incorpore a la atmósfera. «Almacenarlo» suena sencillo, pero el único depósito cercano y lo bastante grande como para albergar enormes cantidades de CO_2 es el subsuelo. Según los expertos, los poros de las rocas sedimentarias emplazadas en los kilómetros más superficiales de la corteza terrestre podrían acumular una cantidad de CO_2 equivalente a siglos de emisiones, al menos en teoría.

Almacenar el 15 por ciento de las emisiones de EE.UU. requeriría secuestrar una gigatonelada de CO_2 al año. La industria energética global extrae anualmente unas cuatro gigatoneladas de crudo y unas dos gigatoneladas de gas natural a partir de rocas sedimentarias. Dicha cifra sugiere que enterrar una gigatonelada de CO_2 comprimido debería resultar factible, si bien supondría un esfuerzo mayúsculo. Por supuesto, si otros cambios como mejorar la eficiencia energética o apostar por fuentes de energía alternativas se aplicasen a una escala similar, se reduciría en primer lugar el volumen de CO_2 generado.

El siguiente paso parece obvio: comenzar ya a adaptar las técnicas de producción de petróleo y gas para implementar el almacenamiento geológico de carbono. Por desgracia, esa estrategia ha de hacer frente a un inconveniente fundamental: con el tiempo, el CO_2 tendería a emerger de nuevo hacia la superficie a través de fisuras y poros. Para impedirlo, deberíamos disponer de un «sello» impermeable, un estrato rocoso con poros tan diminutos que el gas no pudiera atravesarlos.

La industria petrolera se beneficia de la existencia de tales flujos ascendentes. El petróleo y el gas de los yacimientos subsuperficiales llegaron a ellos desde rocas más profundas, a través de diversos conductos. A lo largo de su lento y prolongado ascenso, una fracción del fluido queda atrapado, pero gran parte de él prosigue su migración hasta la superficie. Durante los inicios de la industria petrolera, la mayoría de las compañías perforaban allí donde se observaban fugas superficiales.

Los estudios de plumas subterráneas de CO_2 llevados a cabo por varios científicos muestran una situación similar. Aunque numerosas estructuras geológicas impiden el paso del CO_2, siempre aparecen conductos que permiten su ascenso. Sin embargo, los ingenieros podrían sacar partido de una interesante peculiaridad del dióxido de carbono: aunque la mayoría de los líquidos se tornan menos densos cuando en ellos se disuelve un gas, al inyectar CO_2 en agua, la densidad aumenta. La mayor parte del líquido acuoso que descansa en las profundidades es salmuera

(agua muy salina), cuya densidad también se incrementa al incorporar CO_2. Por tanto, si el dióxido de carbono se almacenase de esa forma, el riesgo de ascenso desaparecería, ya que tendería a hundirse y aumentaría la seguridad de la captura.

ENERGÍA PARA CUBRIR LOS GASTOS

El problema reside en que, en las condiciones de temperatura y presión a las que suelen encontrarse las salmueras profundas, el CO_2 tarda mucho en disolverse por sí solo. De modo que, hace un tiempo, junto con Mac Burton, por entonces uno de mis estudiantes de doctorado, propusimos una idea radical: excavar un pozo hasta la salmuera, traerla la superficie, presurizarla, inyectar CO_2 (que se disolvería rápidamente en un tanque de mezcla) y enviarla de regreso al subsuelo.

Pero semejante plan requeriría grandes cantidades de energía. Además, la salmuera puede retener relativamente poco CO_2 en peso, por lo que deberían extraerse cantidades enormes. Cualquiera de estos dos inconvenientes amenazaba con echar por tierra la idea.

El segundo problema no parecía tan desalentador. En las reservas petrolíferas, las compañías suelen excavar varios pozos equidistantes. A través de un conjunto de ellos se inyecta agua o salmuera, la cual presiona el petróleo profundo y fuerza su ascenso por las otras perforaciones de la explotación. Hoy en día, la industria inyecta en los yacimientos de combustibles fósiles unas 10 gigatoneladas anuales de salmuera, la mayoría extraída en el mismo lugar. Por tanto, debería resultar factible lograr el flujo de salmuera necesario para enterrar grandes volúmenes de CO_2. En un mismo punto de almacenamiento, una serie de pozos extraerían el fluido salino; al mismo tiempo, la salmuera con el CO_2 disuelto se inyectaría a través de otras perforaciones.

El primer inconveniente —el capital necesario para excavar los pozos y la energía requerida para mantenerlos en funcionamiento— se antojaba mucho más difícil de superar. La razón por la que la industria no se ha apresurado a capturar y almacenar el CO_2 obedece a la falta de incentivos económicos: en general, las emisiones no se gravan con sanciones o impuestos, y los argumentos de política ambiental basados en la necesidad de proteger el planeta o en cubrir el «coste total» del uso de combustibles fósiles (incluida la alteración del medioambiente) no han persuadido a nadie para imponer tales medidas. A primera vista, no parecía haber ningún mecanismo para financiar la inyección de CO_2 en salmuera.

No hace mucho, sin embargo, desde uno de los despachos de la Universidad de Texas en Austin muy próximo al mío, surgió una idea prometedora. Gary Pope, catedrático en ingeniería petrolífera que ha dedicado la mayor parte de su carrera a mejorar los métodos de extracción de crudo, reparó en la posibilidad de explotar un recurso oculto.

El golfo de México, al igual que otras regiones productoras de petróleo del mundo, alberga acuíferos salinos profundos ricos en metano disuelto. El metano es uno de los componentes principales del gas natural, por lo que puede emplearse como combustible o distribuirse con facilidad a lo largo de una red de gasoductos. Por tanto, una vez que la salmuera llegase a la superficie, podríamos extraer de ella el metano e inyectar CO_2. Incluso al bajo precio del gas natural, el beneficio obtenido gracias al metano y al calor geotérmico tal vez compensase los costes del secuestro de CO_2. El siguiente paso era estudiar si el proceso podía autofinanciarse. Junto con Pope, reclutamos a un estudiante de doctorado, Reza Ganjdanesh, para estudiar la cuestión.

En una perforación tradicional, la salmuera que asciende por un pozo de producción va perdiendo presión poco a poco y liberando una fracción del metano. Disolver CO_2 en la salmuera provoca la expulsión de más metano. Por otra parte, buena parte de los acuíferos de las costas de Texas y Luisiana emplazados a más de tres kilómetros de profundidad se hallan sometidos a altas presiones, por lo que se necesitaría poca energía, o ninguna en absoluto, para extraer la salmuera hasta la superficie.

Además, la elevada temperatura de los acuíferos permitiría emplear la salmuera como fuente de energía geotérmica. Según los cálculos de Ganjdanesh, el proceso combinado (la extracción de metano y agua caliente al tiempo que se inyecta CO_2) liberaría bastante más energía que la requerida para llevar a cabo la operación. Tal forma de almacenamiento geológico de carbono, con un balance de energía positivo, resultaría atractiva desde el punto de vista económico incluso en un mundo sin tasas sobre las emisiones de carbono.

PERFORAR LA PIRÁMIDE

Nuestra propuesta también puede verse como un método para extraer combustible. Según un dicho popular en la industria de combustibles fósiles, el petróleo fácil está acabado. Y el gas fácil también. Las compañías han perforado durante décadas los yacimientos de petróleo y gas más accesibles, concentrados y fáciles de explotar, en los que el combustible ascendía sin problemas hacia la superficie. Pero, a medida que dichas reservas se han ido agotando, las empresas han comenzado a descender peldaños en la «pirámide de recursos», dirigiendo su interés hacia combustibles fósiles menos accesibles.

Entre los últimos tres y cinco años, la producción estadounidense de petróleo y gas ha aumentado gracias a la fracturación hidráulica de lutitas profundas. Pero extraer cualquier material a partir de dichas rocas supone una tarea lenta y ardua. Además, tanto el petróleo como el gas se encuentran en concentraciones mucho menores. Con todo, la fracturación hidráulica constituye el siguiente paso lógico en el descenso de la pirámide, pues aunque la demanda de combustible continúa creciendo, el número de reservas fáciles de explotar disminuye.

Pero la pirámide de recursos presenta una característica tentadora: por regla general, la cantidad de reservas aumenta cuanto más difícil resulta extraerlas. Solo el volumen de gas natural atrapado en lutitas ya lo convierte en un objetivo atractivo, por más que su extracción implique un proceso menos eficiente que la explotación tradicional.

Tras el gas de lutitas, el siguiente peldaño en la pirámide de recursos sería el metano disuelto en yacimientos de salmueras. Si bien este combustible se encuentra cinco veces menos concentrado que en las lutitas, la cantidad total disponible resulta asombrosa. Según las estimaciones realizadas para el golfo de México, su volumen oscilaría entre varias decenas y algunas centenas de billones de metros cúbicos (Tm^3). Como referencia, el consumo estadounidense de gas natural durante la última década ha oscilado entre 0,56 y 0,7 Tm^3.

A la vista de semejantes reservas, durante los años setenta y ochenta, el Departamento de Energía (DOE) estadounidense excavó varios pozos a fin de sondear los depósitos profundos de salmuera. Si bien esta logró extraerse, la producción de metano a partir de agua salina no podía competir en términos económicos con otras fuentes.

Aún hoy, la extracción de metano a partir de salmuera sigue sin poder pugnar en el mercado. Sin embargo, su otro gran beneficio potencial —la producción de energía geotérmica— tal

Eliminar CO_2 y obtener energía

Enterrar el dióxido de carbono ayudaría a controlar el calentamiento global. Sin embargo, las técnicas propuestas hasta la fecha implican costes muy elevados. Un nuevo método incorporaría el CO_2 a una salmuera (*parte derecha de la ilustración*) y forzaría la liberación de metano y calor (*parte izquierda*) para electricidad y calefacción. Los beneficios cubrirían los gastos del almacenamiento. Además, el metano podría emplearse como fuente de energía para alimentar la planta de captura de carbono.



vez modificase la ecuación. Medido en escalas de tiempo humanas, el calor del interior de la Tierra proporciona una fuente de energía indefinida. Al igual que otros recursos del subsuelo, su explotación requiere el empleo de pozos de extracción e inyección, una técnica disponible y bien conocida. Si la producción de energía geotérmica a partir de salmuera no ha penetrado más en el mercado, se debe a que la densidad energética del agua caliente resulta unos dos órdenes de magnitud menor que la que se obtiene a partir de la combustión del mismo volumen de carbón, petróleo o gas.

Esa valoración tan pesimista se refiere al aprovechamiento de la energía geotérmica para generar electricidad. Sin embargo, según un informe reciente del DOE, cerca del 10 por ciento del consumo energético estadounidense se destina a la calefacción y refrigeración de edificios y al agua caliente doméstica. Para ello, los 1200 grados Celsius de la llama de un calentador de gas resultan a todas luces excesivos. La energía geotérmica puede bastar para aplicaciones de baja intensidad, como el aire y el agua calientes. Desde hace años, las bombas geotérmicas han venido cumpliendo ese cometido con éxito en multitud de hogares europeos.

TRES EN UNO

Ni el enterramiento de CO_2 ni la extracción de salmuera para obtener metano o para aprovechar su energía geotérmica constituyen, por sí mismos, procesos económicamente viables. Pero la combinación de todos ellos comienza a parecerse a una banqueta con tres patas, en la que cada una garantiza la estabilidad de las otras dos. Con todo, la gran pregunta es si un sistema semejante podría secuestrar una cantidad de CO_2 suficientemente elevada para lograr una reducción apreciable del carbono acumulado en la atmósfera, tanto a una escala local como internacional.

En fecha reciente hemos realizado algunos cálculos relativos a la costa del Golfo. La región que alberga numerosas centrales de combustibles fósiles y varias industrias generadoras de grandes volúmenes de CO_2. Si se desease mermar aún más las emisiones, el CO_2 podría también transportarse desde zonas distantes. El capital necesario para construir los gasoductos sería elevado, pero los costes de operación resultarían modestos.

En ese aspecto, la escala del proyecto se antoja viable. En la década de los ochenta se construyeron más de 3400 kilómetros de gasoductos cerca de la cuenca pérmica del oeste de Texas. Su objetivo consistía en transportar el CO_2 desde yacimientos naturales profundos hasta campos de petróleo, donde se utilizaba para facilitar la extracción de crudo. La costa presenta enormes yacimientos profundos de salmuera y cuenta con una extensa infraestructura de gasoductos que abastecen al resto del país. Además, se trata de una región muy poblada, lo que posibilitaría la explotación local de la energía geotérmica.

Almacenar una gigatonelada de CO_2 al año (el equivalente a una sexta parte de la tasa de emisiones de EE.UU.) implicaría inyectar y extraer unos 400 millones de barriles de salmuera al día. Se trata de un volumen considerable, pero podría lograrse con unos 100.000 pozos. En comparación, en Texas, se han efectuado ya más de un millón de perforaciones para buscar petróleo y gas. La excavación de semejante cantidad de pozos llevaría décadas; sin embargo, cualquier otro método capaz de reducir una gigatonelada de emisiones de CO_2 al año requeriría un tiempo de construcción similar. Una manera de lograrlo, por ejemplo, sería reemplazar 200 de los gigavatios que hoy se generan en centrales de carbón estadounidenses por energía nuclear. Pero para ello deberían construirse unos 200 reactores de gran tamaño, lo que también llevaría décadas.

En este caso, sin embargo, la tasa de generación de energía permitiría además financiar la técnica. Almacenar una gigatonelada de CO_2 produciría unos 0,1 Tm^3 de gas natural al año, cerca de una sexta parte del consumo estadounidense actual. En 2012, el país extrajo unos 0,25 Tm^3 de gas natural a partir de lutitas, por un valor de unos 25.000 millones de dólares.

La obtención de energía geotérmica también alcanzaría cotas notables. Si el calor se utilizara para suministrar aire y agua calientes (y si se aprovechara en intercambiadores de calor que transformasen el aire caliente en frío para aire acondicionado), la potencia generada equivaldría a la obtenida a partir del metano: unos 200 gigavatios. Desconocemos si existiría tanta demanda a lo largo de la costa del Golfo, aunque numerosas plantas petroquímicas de la región, así como las unidades de captura de carbono que se construirían, podrían consumir una buena parte. Como alternativa, si la energía geotérmica se convirtiese en electricidad con un 10 por ciento de eficiencia —lo habitual en otras zonas—, se producirían unos 20 gigavatios de electricidad, una cantidad nada despreciable. La capacidad eólica de EE.UU., por ejemplo, suma unos 50 gigavatios.

Nuestro sistema parece presentar unos índices de producción lo bastante elevados como para contribuir a una reducción de emisiones a gran escala. A un ritmo de almacenamiento de una gigatonelada al año, en un siglo se secuestrarían 100 gigatoneladas de CO_2 y se producirían unos 10 Tm^3 de metano, menos de una décima parte de la cantidad que se cree contenida en los acuíferos profundos de la costa del Golfo. Por tanto, el método ofrece un amplio margen tanto para almacenar CO_2 como para suministrar metano.

Si ese metano se quemara en centrales eléctricas, aun sin capturar el CO_2 que liberara su combustión, la disminución neta de las emisiones de CO_2 equivaldría a 80 gigatoneladas en un siglo de funcionamiento. Se trataría, por tanto, de una reducción sustancial. Según los cálculos de la Unión de Científicos Preocupados (UCS), para que la concentración global de CO_2 atmosférico no supere las 450 partes por millón (el valor que suele considerarse límite para que el calentamiento no exceda los dos grados Celsius), EE.UU. y otros países industrializados deberían reducir sus emisiones hasta alcanzar, en 2050, en torno al 25 por ciento de los niveles del año 2000. Para ello, EE.UU. debería evitar la emisión de unas 150 gigatoneladas de CO_2 de aquí a 2050. Incluso si la captura con salmuera tardase 20 años en alcanzar una tasa de secuestro de una gigatonelada al año, aún podría dar cuenta del 15 por ciento de la reducción total que necesita el país.

Por supuesto, los pozos y las centrales de inyección de salmuera deberían construirse y mantenerse en funcionamiento con sumo cuidado, a fin de evitar fugas de metano a la atmósfera. Las perforaciones se asemejarían a los pozos costeros tradicionales de extracción de petróleo y gas, una técnica veterana. La Agencia de Protección Ambiental estadounidense cuenta con un sólido programa destinado a detectar las emisiones y su procedencia. Por otro lado, la industria no querrá perder la oportunidad de vender un producto con valor comercial. El procesado de la salmuera, del metano y del CO_2 no resultaría mucho más complejo que las operaciones realizadas en las centrales petroquímicas al uso. Por último, dado que en los yacimientos profundos solo se transferirían líquidos, tanto la perforación como la gestión de los pozos se asemejarían en gran medida a la extracción tradicional de petróleo. Adoptar dicho proceso

EMILY COOPER

evitaría los problemas asociados a la fracturación hidráulica de pizarras, la cual requiere inyectar en el subsuelo grandes volúmenes de agua dulce cargada de productos químicos, que luego debe desecharse de forma segura [*véase* «Los inconvenientes de la fracturación hidráulica», por Chris Mooney; Investigación y Ciencia, enero de 2012].

Además, las posibilidades de inducir actividad sísmica serían extremadamente reducidas. Las últimas investigaciones revelan que la adición neta de grandes volúmenes de líquido en determinadas formaciones geológicas (una operación empleada en ocasiones para eliminar aguas residuales) puede acentuar el riesgo sísmico. Sin embargo, la explotación de salmuera tendría lugar como parte de un ciclo cerrado, ya que el fluido salino inyectado se habría extraído previamente de la misma formación rocosa. Por tanto, la presión media de la formación se mantendría constante.

Sin duda, levantar semejante sistema de explotación conllevaría un elevado coste que tal vez repercutiese en la factura de los consumidores. Pero lo mismo ocurriría con cualquier otra estrategia capaz de reducir de manera notable las emisiones de carbono, tanto si hablamos de construir miles de granjas solares y eólicas, como de reemplazar centrales de carbón por 200 nuevos reactores nucleares.

PRIMEROS PASOS

Tras realizar un gran número de cálculos, podemos decir que nuestro sistema de captura con salmuera parece funcionar sobre el papel. Las instalaciones de prueba desempeñarán una función decisiva a la hora de determinar si el método podrá llevarse a la práctica. Varios investigadores de los Laboratorios Sandia, el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore y la Universidad de Edimburgo están diseñando métodos para inyectar CO_2 en salmuera y extraer energía de manera eficiente. Al mismo tiempo, dos compañías que prefieren permanecer en el anonimato están contemplando la posibilidad de construir centrales piloto en la costa del Golfo. Adquirir experiencia hoy constituiría un prudente ejercicio. Si el mundo alberga alguna esperanza de limitar el calentamiento global, las emisiones de CO_2 deberían comenzar a reducirse de inmediato.

La costa del Golfo en Estados Unidos ofrece un emplazamiento óptimo para llevar a cabo el secuestro de carbono con salmuera. No obstante, las emisiones representan un problema de dimensiones globales. Desconocemos en qué otras ubicaciones podría aplicarse este proyecto, pero el elemento clave es la salmuera rica en metano, cuya existencia puede esperarse allí donde hay hidrocarburos. China y Rusia, países con emisiones crecientes de carbono y extensas cuencas de petróleo y gas, podrían ser buenas zonas en las que comenzar a explorar.

PARA SABER MÁS

Eliminating buoyant migration of sequestered CO_2 through surface dissolution: Implementation costs and technical challenges. McMillan Burton y Steven L. Bryant en *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, vol. 12, n.º 3, págs. 399-407, junio de 2009.

Coupled CO_2 sequestration and energy production from geopressured-geothermal aquifers. Reza Ganjdanesh et al. Presentado en el Congreso de Técnicas de Gestión de Carbono; Orlando, Florida, 7-9 de febrero de 2012.

Regional evaluation of brine management for geologic carbon sequestration. Hanna M. Breunig et al. en *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 14, págs. 39-48, mayo de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Qué hacer con el carbón? David G. Hawkins, Daniel A. Lashof y Robert H. Williams en *IyC*, noviembre de 2006 (*número monográfico sobre energía*).

por Carlos María Romeo Casabona



Carlos María Romeo Casabona es director de la cátedra interuniversitaria de derecho y genoma humano de las Universidades de Deusto y del País Vasco.

¿Ciudadanos transparentes?

La privacidad genética, entre los intereses de la ciencia y los derechos de las personas

Debido al constante avance de la biología molecular y del conocimiento del genoma humano, la investigación biomédica está experimentando un gran desarrollo en varias áreas.

Entre estas destacan la medicina predictiva y preventiva, la cual, gracias a los análisis genéticos, determina el riesgo de aparición de una enfermedad antes de que se manifiesten sus primeros síntomas, lo que permite aplicar medidas terapéuticas o preventivas. También la medicina personalizada, que, a partir del conocimiento de las reacciones de cada persona en virtud de su perfil genético, podrá aplicar medicamentos individualizados, más eficaces y menos agresivos para el paciente (farmacogenética). Y la medicina regenerativa, que permitirá reconstruir partes del cuerpo dañadas por traumatismos o disfuncionalidades como consecuencia de enfermedades degenerativas (párkinson, alzhéimer, diabetes).

Puesto que el avance de estos campos depende en gran medida de la obtención y uso de datos genéticos personales, son necesarias reflexiones y respuestas éticas y legales, que valoren las particularidades de tan delicada información. Veamos sus rasgos principales.

Primero, los datos genéticos son permanentes e inalterables. Segundo —y lo más importante—, poseen una gran capacidad predictiva sobre enfermedades genéticas que una persona desarrollará en el futuro (como la de Huntington) o para la que presenta una elevada predisposición genética (cáncer de mama y de ovarios); puede revelar también la condición de portador, lo que significa que, incluso aunque el individuo no llegue a padecer la enfermedad, podrá transmitirla a su descendencia, que quizá sí la sufra. Tercero, se trata de una información singular y exclusiva: no se comparte en su totalidad con otras personas, salvo en el caso de gemelos monocigóticos. Y cuarto, tiene vinculación con nuestros familiares biológicos, ya que informa también sobre su salud —lo que nos ocurra a nosotros también podría sucederles a ellos.

A la vista de lo anterior, los expertos en ética y derecho han concluido que la información genética individual merece una protección particular. Debería ser semejante a la reconocida para los datos relativos a la salud, considerados por las legislaciones estatales como «datos sensibles», puesto que aumentan la vulnerabilidad de la persona frente a prácticas discriminatorias de terceros. Así lo entiende también la ley española de investigación biomédica de 2007, que trata de conciliar los intereses de los científicos con la privacidad genética de las personas.

No obstante, este estado de cosas podría acentuarse todavía más en los años inmediatos. Y pueden ser de tal envergadura los nuevos problemas que tal vez los organismos internacionales deban intervenir para establecer marcos de actuación que eviten que nos convirtamos en ciudadanos «transparentes» y desprotegidos.

Pensemos en la secuenciación completa del genoma humano individual y las secuenciaciones parciales masivas. Los especialistas apuntan que, al haber bajado tanto su precio, estos análisis serán de uso médico cotidiano en un plazo muy corto, de modo que cada vez más personas tendrán su «mapa» genético individual completo.



LONELY/THINKSTOCK

¿Cómo se gestionará entonces la ingente cantidad de información sensible que se acumulará en los hospitales? Deberá prestarse especial celo a su protección frente a terceros (en particular los no autorizados), pues es previsible que aumente el riesgo de prácticas discriminatorias o estigmatizadoras. En cuanto a la transmisión de la información a los interesados, ¿deberán comunicarse todos los resultados? ¿También los de impacto remoto? ¿Y los hallazgos inesperados sobre su salud futura?

En relación con la medicina reproductiva, la secuenciación masiva del ADN en los no nacidos (fetos, embriones y embriones in vitro) puede aportar abundante información sobre anomalías genéticas que pueden manifestarse después del nacimiento o durante la gestación. Algunos sostienen que esta información podría provocar una extensión de la práctica del aborto (interrupción voluntaria del embarazo). Probablemente lo mejor será mantener la norma extendida de que debe existir una indicación previa para cualquier análisis genético del embrión in vitro (obtenido en el laboratorio) o durante el embarazo. Aunque es difícil prever si en el futuro la secuenciación prenatal masiva resultará útil, por el momento podría prescindirse de ella y deliberarse sobre sus posibles ventajas e inconvenientes.

La secuenciación masiva debe, pues, someterse a los principios de proporcionalidad (¿superan las ventajas a los inconvenientes?), pertinencia (¿reviste interés clínico?) y calidad (¿es fiable?). Los análisis genéticos han de continuar vinculados al consejo de un especialista. Solo así se evitarán prácticas de mero consumo en el mercado sin control que ha abierto internet.

por José Díez

José Díez es profesor de filosofía de la ciencia en la Universidad de Barcelona.



Los conceptos científicos

Clasificar, comparar, medir

La ciencia consiste en un conjunto de prácticas, tales como contrastar hipótesis, realizar experimentos, proponer explicaciones o construir modelos y teorías. La teorización consta a su vez de otras prácticas, como la conceptualización, o acuñación de nuevos conceptos. Con ellos, los científicos formulan leyes, y combinando leyes generan teorías, que pueden ser aglutinadas en grupos de teorías o disciplinas científicas. Por ejemplo, con los conceptos de *masa*, *fuerza*, *atracción* y *distancia* se formula la famosa ley de la gravitación de Newton: «Cualesquiera dos partículas se atraen con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia». Esta ley se combina con otras, como la no menos famosa «$f = m \cdot a$», conformando la mecánica clásica, una de las teorías mecánicas dentro de la física. Los conceptos científicos son, por así decir, donde todo empieza.

Usamos los conceptos en nuestra representación del mundo y en la comunicación con los demás. Tienen que ver, por tanto, con nuestras representaciones mentales y con el lenguaje, pero no son ni entidades mentales subjetivas, ni entidades lingüísticas. Tomemos el concepto ordinario de *montaña*. Dicho concepto no es la palabra española «montaña», ni la inglesa «*mountain*», ni ningún otro vocablo; es lo que todas esas palabras sinónimas significan. Tampoco constituye una representación mental subjetiva. Cuando dos personas entienden la oración «José subió la montaña», sus imágenes mentales difieren, mientras que lo que entienden ambos, el contenido de la frase, del cual *montaña* forma parte, es lo mismo. Los conceptos corresponden, pues, a lo expresado por ciertas palabras y captado por la mente.

Resulta esencial distinguir también entre conceptos y propiedades en el mundo (como la de ser tigre, agua u oro). Los primeros no pueden identificarse con las segundas, pues puede haber conceptos a los que no corresponde ninguna propiedad en el mundo (pensemos en *minotauro* o *flogisto*). Un problema filosófico interesante consiste en averiguar cómo las teorías científicas que usan conceptos que no corresponden a nada en el mundo (*flogisto*, *calórico*, *éter*) pueden tener éxito predictivo.

Los conceptos vienen a ser, pues, «la idea» que expresan los términos conceptuales con significado. Es muy difícil caracterizar esa entidad. Los filósofos no se ponen de acuerdo, más allá de que no es meramente lingüística ni subjetiva. Pero, para lo que sigue, nos bastará con esta noción general de concepto como la idea de la propiedad que existiría en el mundo, caso de referir el término conceptual a una propiedad del mundo.



DAJ/THINKSTOCK

Lo dicho hasta aquí se aplica a todos los conceptos, incluidos los científicos. A diferencia de los ordinarios, los conceptos científicos se distinguen por una gran precisión. Casi todos los conceptos ordinarios son vagos: si bien presentan casos claros de aplicación y de no aplicación, su uso no siempre queda claro (¿cuánto pelo debe faltarle a alguien para que podamos considerarlo *calvo*?). Para la mayoría de los fines cotidianos, la vaguedad no es mala. Sí lo es, en cambio, para la ciencia, cuyas finalidades (como diseñar satélites o medicinas) requieren un altísimo grado de precisión. Por eso los científicos acuñan conceptos más precisos que los ordinarios.

Existen tres tipos principales de conceptos científicos: clasificatorios, comparativos y métricos, progresivamente más precisos. Los conceptos clasificatorios (*mamífero*, *nitrato*, *conífera*) son propios de las ciencias clasificatorias o taxonómicas, como ciertas ramas de la química, la botánica o la mineralogía. Las ciencias taxonómicas no acuñan conceptos clasificatorios sueltos, sino en familias: las clasificaciones. Una clasificación es una colección de conceptos que, aplicados a cierto conjunto de objetos, lo divide en grupos o taxones. Por ejemplo, la clasificación «*mamíferos*, *aves*, *reptiles*, *anfibios*, *peces*» divide al conjunto de los vertebrados en cinco taxones. Para que una familia de conceptos constituya una buena clasificación ha de generar una partición del conjunto inicial: todo individuo ha de pertenecer a algún taxón, ningún individuo puede hallarse en dos taxones y no puede haber ningún taxón vacío.

Las ciencias taxonómicas más interesantes no presentan una única clasificación, sino varias sucesivas tales que unas refinan a otras. Los seres vivos se clasifican en hongos, animales, plantas, y

protistas. A su vez, los animales se clasifican en protozoos, poríferos, celenterados... Y así sucesivamente. Estas series de clasificaciones son las jerarquías taxonómicas. Por otro lado, cada clasificación se realiza atendiendo a cierto criterio (el que expresan los conceptos clasificatorios que conforman la clasificación), y diferentes criterios (morfológicos, funcionales, etcétera) pueden dar lugar a distintas clasificaciones. Determinar cuál es el mejor criterio para clasificar un conjunto de objetos constituye uno de los problemas más importantes, y filosóficamente más interesantes, de las ciencias taxonómicas.

Las clasificaciones son óptimas para conceptualizar propiedades del tipo «todo o nada». Un animal es tigre o no; una planta es conífera o no lo es (un animal no es más, o menos, tigre que otro, ni una planta más, o menos, conífera que otra). Pero no todas las propiedades del mundo son de este tipo. La masa no es una propiedad de «todo o nada», sino gradual: dados dos cuerpos con masa, tiene sentido decir que uno tiene más, o menos, o igual, masa que el otro. Lo mismo sucede con la longitud, la temperatura, la densidad y muchas otras. Obviamente, las clasificaciones no son óptimas para conceptualizar propiedades graduales. Para ello necesitamos conceptos comparativos.

Los conceptos comparativos permiten ordenar los objetos de un cierto conjunto según el grado en que estos tienen una propiedad, y lo hacen atendiendo a cierto criterio de comparación. El criterio comparativo permite determinar, para dos objetos cualesquiera dentro del conjunto, cuál de ellos posee la propiedad en mayor grado, o si ese grado es el mismo para ambos. Un concepto comparativo, *masa*, para la masa podría ser el siguiente: x es tan o más masivo que y si y solo si, al colocarlos en los platos de una balanza, el plato de y no desciende respecto del de x. Un concepto comparativo, *temp*, para la temperatura, podría formularse así: x es tan o más caliente que y si y solo si, pasando un tubo con mercurio de x a y la columna de mercurio no asciende. Y análogamente para las otras propiedades como la longitud, la densidad o la dureza.

Para una propiedad gradual puede haber más de un procedimiento de comparación. Así, también pueden compararse masas de este otro modo: x es tan o más masivo que y si suspendiendo x de un muelle y sustituyéndolo después por y, el muelle no desciende. Este no es el concepto anterior, *masa*, sino otro diferente, *masa**. Un problema filosófico interesante consiste en determinar cuándo dos conceptos comparativos conceptualizan la misma propiedad. Otro, hallar la forma de generalizar un concepto para objetos no comparables mediante un procedimiento dado (¿Cómo podemos ordenar, por masa, planetas o átomos, objetos que no podemos poner en balanzas ni muelles?).

Los conceptos comparativos son óptimos para conceptualizar cualitativamente las propiedades graduales. Sin embargo, se les escapa algo. Supongamos que tengo en mi mesa un libro, tres lápices (idénticos) y cinco bolígrafos (idénticos), y que los comparo mediante una balanza. El libro tiene más masa que un lápiz o un bolígrafo, un bolígrafo más que un lápiz, los lápices son igual de masivos entre sí, y los bolígrafos también. Eso es todo lo que podemos decir con nuestro concepto comparativo. No obstante, hay una diferencia cuantitativa que se nos escapa: dos lápices juntos, por ejemplo, equilibran un bolígrafo, pero necesito ciento cincuenta bolígrafos para equilibrar el libro. El libro es mucho más masivo respecto del bolígrafo, de lo que el bolígrafo es respecto del lápiz. Para capturar estas diferencias en el grado en que se tiene una propiedad gradual, los científicos acuñan conceptos cuantitativos o métricos.

Los conceptos métricos son los más precisos y útiles, pero también los más complejos. Asignan a los objetos números que representan el grado en que cada objeto tiene la propiedad. Un concepto métrico de masa puede asignar al libro el número 600, a cada bolígrafo el 40 y a cada lápiz el 20; otro puede asignar al libro 0,6, a cada bolígrafo 0,04 y a cada lápiz 0,02. Existen varias asignaciones posibles, y cada sistema de asignación corresponde a una escala. En nuestro ejemplo, la primera asignación se hace en la escala de gramos y la segunda en la de kilogramos. Y hay otras muchas, como la escala de libras o la de onzas.

Asimismo, debe cumplirse cierta condición: si un objeto tiene la propiedad en mayor o igual grado que otro, cualquier escala aceptable debe asignar al primero un número mayor o igual que al segundo. Es decir, las asignaciones numéricas deben preservar el ordenamiento cualitativo. Esto es así para todas las escalas. Sin embargo, algunas especialmente útiles cumplen condiciones adicionales. Pongamos que un libro se equilibra con ciento cincuenta bolígrafos y un bolígrafo con 2 lápices. En este caso, el número asignado a cada bolígrafo ha de ser el doble del asignado a cada lápiz, y el asignado a cada libro 150 veces el de cada bolígrafo. Las escalas de este tipo (como las de masa, longitud y otras) se llaman proporcionales, y son las más útiles para la ciencia.

Pero no todas las propiedades graduales pueden medirse mediante escalas proporcionales. La temperatura termométrica, por ejemplo, se mide con otro tipo de asignaciones, menos útiles que las proporcionales: nos referimos a las escalas de intervalos. La teoría de la medición explica cómo es posible que entidades matemáticas como los números se apliquen a la realidad física, cómo es posible medir una propiedad con uno u otro tipo de escala y en qué sentido unas escalas resultan más útiles que otras.

Los conceptos cuantitativos o métricos constituyen el máximo grado de conceptualización de la naturaleza. Gracias a ellos, las teorías que los usan pueden disponer de todo el rigor y la potencia del aparato matemático, logrando así un asombroso grado de precisión, tanto en sus formulaciones teóricas como en sus predicciones y aplicaciones prácticas. Por ello la matematización de una disciplina es el ideal al que todo científico secretamente aspira, y su logro representa un paso de gigante en las capacidades teóricas y prácticas de la misma. Estos conceptos, con los que culmina la capacidad conceptualizadora de la ciencia, son los que Galileo tiene en mente cuando escribe: «Este libro abierto ante nuestros ojos, el universo, [...] está escrito en caracteres matemáticos [...] sin los cuales es imposible entender una palabra, sin ellos es como adentrarse vanamente por un oscuro laberinto» (*Opere* VI, 232).

PARA SABER MÁS

Fundamentals of concept formation in empirical science. C. G. Hempel. University of Chicago Press, 1952.

Philosophical foundations of physics. R. Carnap. Basic Books, 1966.

Conceptos y teorías de la ciencia. J. Mosterín. Alianza, 2002.

Fundamentos de filosofía de la ciencia. (3.ª ed.) J. Díez y C. U. Moulines. Ariel, 2008.

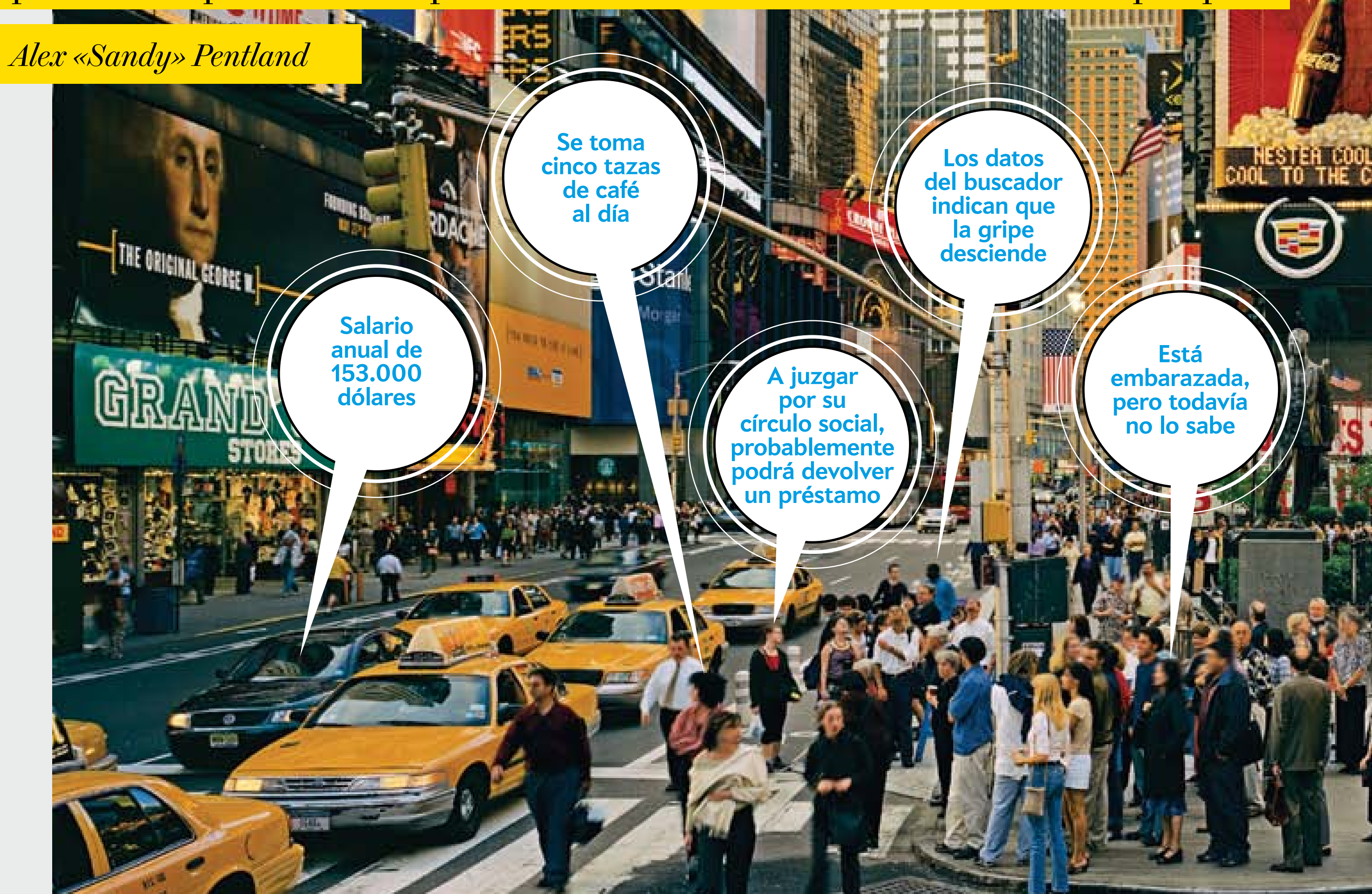
EN NUESTRO ARCHIVO

La estructura de los conceptos científicos. J. Mosterín en *IyC*, enero de 1978.

UNA SOCIEDAD DIRIGIDA POR DATOS

Las huellas digitales que a diario vamos dejando hablan de nosotros mucho más de lo que imaginamos. Podrían amenazar gravemente nuestra privacidad, pero también podrían sentar las bases de un mundo más próspero

Alex «Sandy» Pentland




Acaba de solicitar una séptima tarjeta de crédito
Reciente cambio en sus mensajes de texto; quizá tiene una nueva novia
Se desplaza casi 2 kilómetros diarios para acudir al trabajo
Según datos registrados en el GPS de su móvil, camina 9 kilómetros al día
Sus registros en la Web y el teléfono indican que le desagrada su médico

Alex «Sandy» Pentland dirige el laboratorio de dinámica humana del Instituto de Tecnología de Massachusetts y colabora con el Foro Económico Mundial en iniciativas sobre macrodatos e información privada.



MEDIADO EL SIGLO XIX, LA VELOZ EXPANSIÓN URBANA VINCULADA A LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL PROVOCABA GRANDES PROBLEMAS SOCIALES Y AMBIENTALES

En respuesta a ello, las ciudades crearon redes centralizadas para el suministro de agua potable, energía y alimentos seguros; se facilitaba de este modo el transporte y el comercio, así como un acceso ordenado a la energía y a la atención sanitaria.

Hoy en día, sin embargo, tales soluciones se revelan insuficientes: el tráfico congestiona las ciudades; las instituciones políticas se hallan estancadas y, por encima de todo, tenemos que alimentar y alojar a una población humana que va a sobrepasar los dos mil millones, al tiempo que evitamos los peores efectos del calentamiento global.

Los problemas del siglo XXI exigen un nuevo modo de pensar. Todavía hoy abundan los economistas y sociólogos que aplican conceptos propios de la Ilustración, como mercados y clases, modelos simplificados que reducen las interacciones sociales a reglas o algoritmos sin atender al comportamiento individual de las personas. Es preciso profundizar más para apreciar los finos engranajes de las relaciones sociales. Los macrodatos (*big data*) nos facilitan medios para semejante tarea.

La tecnología digital permite analizar infinidad de intercambios entre personas acerca de ideas, dinero, mercancías o rumores. En mi laboratorio del Instituto de Tecnología de Massachusetts estudiamos mediante ordenadores los patrones matemáticos subyacentes a tales intercambios; empezamos ya a explicar ciertos fenómenos antaño incomprensibles, como crisis financieras, revoluciones o epidemias. Estos análisis nos ofrecerán sistemas bancarios estables, Gobiernos eficaces y atención sanitaria asequible y eficiente, entre otras ventajas. Pero, ante todo, deberemos apreciar por entero las posibilidades de los macrodatos y configurar un esquema para su uso correcto. La capacidad de seguir, predecir e incluso controlar el comportamiento de individuos o grupos constituye un clásico ejemplo del fuego de Prometeo, que tanto puede salvar como exterminar.

PISTAS DIGITALES

En nuestra vida diaria dejamos atrás rastros virtuales, a la manera de migajas de pan, sobre las personas a las que llamamos, los lugares visitados, los alimentos consumidos y los productos adquiridos. Estas pistas narrarán nuestra vida con mucha mayor precisión que cualquier otro medio elegido. Las actualizaciones que realizamos en Facebook o nuestros mensajes en Twitter transmiten la información que decidimos comunicar a los demás, redactada según los estándares del momento. Por el contrario, las pistas digitales registran nuestro quehacer tal como realmente ocurrió.

Somos animales sociales, por lo que nuestra conducta nunca es tan singular como pudiera pensarse. Las personas con las que hablamos, nos escribimos y convivimos, incluso las que reconocemos pero nunca hemos saludado formalmente, sin duda se nos asemejan en múltiples aspectos. Mi grupo de investigación puede adivinar si alguien va a padecer diabetes examinando los restaurantes donde come y las personas que frecuenta. Esos mismos datos nos permiten predecir el tipo de ropa que le gusta comprar a esa persona o su buena disposición para devolver un préstamo. Los cambios de comportamiento que ocasiona una enfermedad (acudimos a lugares diferentes, compramos otras cosas, llamamos a personas distintas y buscamos otros términos en la Red) permiten, a través del análisis de datos, elaborar un mapa en constante revisión con capacidad de predecir el lugar de la ciudad donde los residentes tenderán a contraer la gripe en un momento dado.

Los instrumentos matemáticos integrados en los macrodatos que ofrecen una

EN SÍNTESIS

Los municipios y Gobiernos actuales todavía siguen pautas marcadas hace dos siglos, en la revolución industrial. Los problemas del siglo XXI, como la superpoblación y el cambio climático, exigen un nuevo planteamiento.

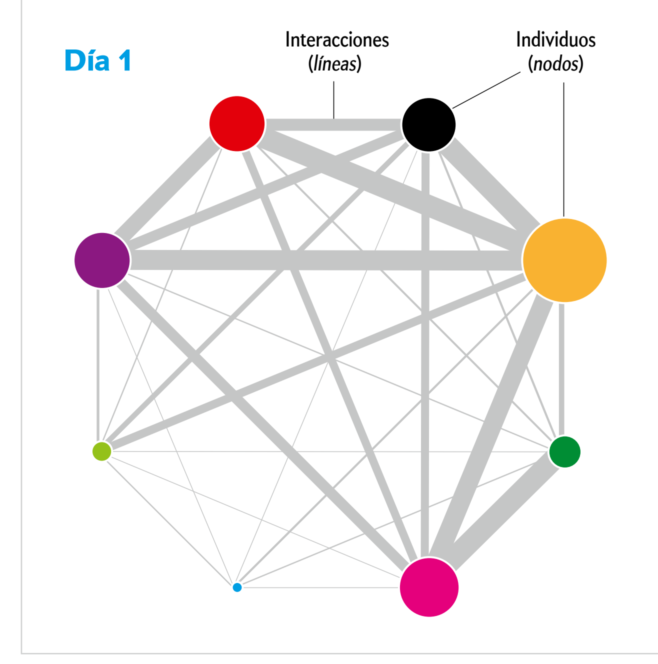
Los macrodatos ofrecen ese nuevo enfoque. Las pistas digitales que vamos dejando atrás en nuestro quehacer revelan sobre nosotros más de lo que hubiésemos deseado y constituyen un poderoso instrumento para abordar problemas sociales.

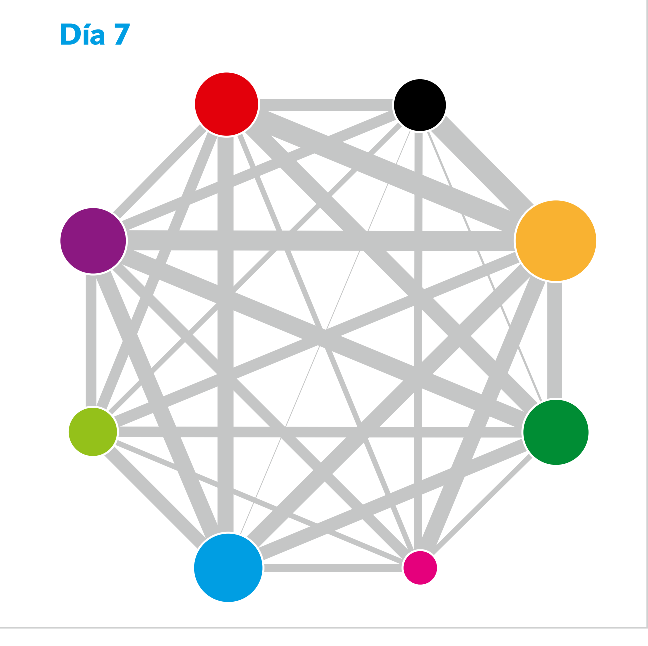
No por ello nos dejará de inquietar el mal uso de esa información. Mientras que el tratamiento de los datos no nos ofrezca una sociedad más segura y próspera, necesitaremos un nuevo acuerdo que nos dé más control sobre ellos.

PÁGINAS ANTERIORES: ANDREW MOORE, GALLERY STOCK

Dinámica de grupo

El seguimiento de las interacciones sociales por medio de etiquetas sensoras o datos de teléfonos móviles permite visualizar la dinámica de grupo e informar a los miembros de un equipo sobre las relaciones entre ellos. En el caso representado, el equipo del autor se centró en un grupo de ocho personas. Al final de cada día les entregaban el diagrama de sus interacciones. El tamaño del círculo que rodea a cada miembro (nodo) refleja el grado de comunicación de esa persona con el grupo; el grosor de una línea de conexión entre dos nodos expresa el grado de comunicación entre dos personas. Los diagramas sirvieron para identificar los enlaces débiles e intensificar las relaciones, lo que mejoró la productividad.





visión sobre el funcionamiento de nuestra sociedad se basan en el flujo de ideas y de información entre las personas. Este puede conocerse a partir del análisis de los patrones de interacción social (conversaciones cara a cara, llamadas telefónicas, mensajería por redes sociales), del grado de novedad y de exploración que revelan los hábitos de compra (según las tarjetas de crédito) y del registro de movimientos que señala el GPS. La circulación de ideas resulta esencial para entender la sociedad, no solo porque la información puntual resulte crucial para la eficacia del sistema, sino porque la difusión y la combinación de ideas constituyen la base de la innovación. Las comunidades que se desgajan del resto de la sociedad corren el riesgo de estancarse.

Uno de los hallazgos más sorprendentes de mi grupo es que los patrones del flujo de ideas (reflejados en conductas de compra, movilidad física o comunicaciones) guardan una relación directa con el aumento de la productividad y la creatividad. Los individuos, organizaciones, ciudades, incluso las sociedades enteras que se relacionan con otros y exploran el exterior de su área social logran una productividad mayor, acrecientan su creatividad y viven más años y con mejor salud. Podemos ver variaciones de este fenómeno en todas las especies sociales, incluso en las abejas. La circulación de ideas parece esencial para el bienestar de cualquier colectividad.

Por lo tanto, a la hora de estudiar el funcionamiento de las empresas y los Gobiernos, conviene concebirlos como máquinas de ideas, que las recogen y difunden sobre todo a través de las relaciones individuales. Dos instrumentos matemáticos permiten describir la circulación de ideas.

El primero es la conectividad, definido como la proporción de intercambios interpersonales posibles que se producen de forma regular dentro de un grupo de trabajo. Hay una sencilla relación entre conectividad y productividad: cuando la primera es elevada aumenta la segunda, sin que apenas importe el trabajo que el grupo lleve a cabo o la personalidad de sus miembros. El segundo es la exploración, un índice matemático que mide el grado en que los miembros del grupo traen ideas nuevas del exterior. Es un buen predictor de la innovación y la creatividad.

Mi equipo ha medido ambos parámetros mediante experimentos de campo realizados en empresas de todo el mundo. Para ello hemos provisto a los empleados con placas identificativas sociométricas, unos dispositivos electrónicos que registran las interacciones interpersonales. Descubrimos así que si se promueve la conectividad dentro de un grupo, su productividad aumenta de forma espectacular, y al mismo tiempo se reduce la tensión. De este modo, tras saber que los centros de atención al cliente suelen programar las pausas del café de manera que solo se ausente de su puesto una persona a la vez, convencí al responsable del centro telefónico del Bank of America de que programase las pausas a una misma hora. El objetivo era favorecer una mayor relación entre los empleados. Este único cambio consiguió elevar en 15 millones de dólares la productividad de un año.

Asimismo, hemos observado que la exploración, al establecer contactos nuevos entre las personas, constituye un excelen-

te predictor de la innovación y la producción creativa. Importan mucho más los canales de comunicación directa, sobre todo los presenciales, que los que se valen de la electrónica. En otras palabras, el correo electrónico nunca reemplazará por completo las reuniones y conversaciones.

Hemos comprobado, además, que una alternancia entre exploración y conectividad —es decir, incorporación al grupo de miembros que luego salen a buscar nueva información, la integran en el acervo común y vuelven a iniciar el proceso— suele ir asociada a una creatividad mucho mayor. Mis colaboradores han identificado tal efecto en centros de investigación consolidados, tras medir las interacciones cara a cara y emplear esas medidas para determinar los días de mayor creatividad. El mismo enfoque es aplicable a equipos virtuales con miembros distribuidos en múltiples emplazamientos.

Por medio de patrones de flujo de información similares puede preverse la producción de ciudades y regiones enteras. Las pautas de conectividad y exploración llegan incluso a predecir parámetros sociales como la esperanza de vida, la tasa de criminalidad y la mortalidad infantil. Las zonas donde no circula la información se comportan como un verdadero gueto físico; en cambio, los distritos relacionados entre sí y conectados a comunidades próximas tienden a desarrollar bienestar y prosperidad.

FAVORECER EL FLUJO DE IDEAS

El empleo de macrodatos para diagnosticar problemas y predecir éxitos resulta relevante. Pero aún reviste mayor interés que con ellos podamos diseñar organizaciones, ciudades y Gobiernos que funcionen mejor que los actuales.

Las posibilidades se aprecian mejor en el seno de corporaciones. Al medir la circulación de ideas, suelen identificarse cambios que al aplicarse elevan la productividad y potencian la creatividad. Así sucedió en el departamento de publicidad de un banco alemán, que tropezaba con grandes problemas a la hora de poner en marcha campañas de productos nuevos y deseaba saber dónde estaba el fallo. Mediante el uso de placas identificativas sociométricas, descubrimos que mientras los grupos de dicha entidad se intercambiaban numerosos correos electrónicos, casi nadie hablaba con los empleados del servicio de clientes. La razón era muy sencilla: trabajaban en otra planta del edificio. Esa organización creaba enormes dificultades. De modo inevitable, los publicitarios terminaban por diseñar campañas que el servicio de clientes era incapaz de secundar. Cuando la dirección del banco observó la interrupción del flujo de información en un diagrama que le presentamos, comprendió de inmediato que el servicio de clientes debía trasladarse al mismo piso que el resto de los grupos, con lo que el problema se resolvió.

Favorecer el contacto entre las personas no representa la fórmula mágica que lo soluciona todo. Si a la vez no se refuerza la exploración, pueden surgir problemas. Cuando, junto con el posdoctorado Yaniv Altshuler, medimos el flujo de información dentro de la red social de agentes financieros eToro, nos dimos cuenta de que en cierto momento las personas habían interactuado tanto que la circulación de ideas no hacía más que realimentarse en bucles, sin renovación alguna, una situación en la que suelen crearse burbujas financieras. Así fue como personas supuestamente inteligentes se convencieron de que Pets.com era el mejor valor del siglo.

Por primera vez podemos saber sobre nosotros mismos lo suficiente para construir sistemas sociales que funcionen mejor que los que siempre tuvimos



ZONAS CALIENTES: el análisis de un gran volumen de datos de telefonía móvil permite cartografiar los lugares donde la población corre mayor riesgo de contraer gripe. Se ilustra el resultado de un experimento en el campus del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

CORTESÍA DE WEN DONG Y ALEX PENTLAND

Por suerte, hemos descubierto la posibilidad de gestionar el flujo de ideas entre personas mediante ligeros incentivos individuales. Algunos de ellos estimulan más que otros a que las personas aisladas se relacionen con otras; otros, en cambio, animan a los integrantes de un grupo a explorar fuera de sus contactos actuales. En una prueba realizada sobre 2,7 millones de pequeños inversores individuales en eToro, mejoramos la red entregando a los agentes cupones de descuento que les alentaban a explorar las ideas de un conjunto más variado de otros inversores. De ahí que la red entera mantuviera un estado saludable por reflejarse en ella la opinión de muchos. Cabe destacar que, aunque los incentivos se aplicaran solo a una pequeña parte de los inversores, la rentabilidad de todos los agentes aumentó en más del 6 por ciento.

Preparar intercambios de ideas puede también ayudar a resolver la denominada tragedia de los bienes comunes. En ella, unas cuantas personas se comportan de una manera que perjudica a todo el mundo, pero el impacto sobre cualquier individuo es tan pequeño que hay pocas ganas de solucionar el problema. Tenemos un excelente ejemplo en el ámbito de los seguros sanitarios. Las personas que dejan de tomar los medicamentos que necesitan o no se cuidan debidamente provocan un encarecimiento general del precio del seguro. Otro ejemplo sería una recaudación de tributos demasiado centralizada; ello provoca que las autoridades municipales no pongan mucho interés en que todo el mundo pague impuestos, con lo que crece la evasión fiscal.

La solución habitual consiste en localizar a los infractores y ofrecerles incentivos o imponerles sanciones que les induzcan a mejorar su conducta. El proceso resulta costoso y poco eficaz. Sin embargo, en colaboración con el doctorando Arthur Mani, hemos demostrado que reforzar la relación entre las personas podría reducir tales situaciones a un mínimo. La clave está en ofrecer pequeños incentivos en metálico a quienes tengan más contactos con los infractores y logren persuadirlos a comportarse mejor. En situaciones del mundo real, con iniciativas que fomentan hábitos sanos como el ahorro de energía, hemos comprobado que esa presión social bien aplicada resulta hasta cuatro veces más eficaz que otros métodos tradicionales.

El mismo procedimiento es válido para crear movilización social en casos especiales o de emergencia, como el esfuerzo coordinado para alcanzar objetivos comunes. En 2009, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa (DARPA, por sus siglas en inglés) ideó una prueba para celebrar el cuadragésimo aniversario de Internet. Con ella pretendía demostrar que Internet y los medios sociales podían promover una movilización de emergencia nacional. DARPA ofreció un premio de 40.000 dólares al equipo que primero localizase diez globos rojos colocados por todo el territorio continental de EE.UU. Concursaron cerca de 4000 equipos y casi todos optaron por la solución más fácil: recompensar a quien comunicase haber visto uno. Mi grupo siguió un camino diferente, que consistía en dividir la recompensa entre los que utilizasen sus redes sociales para reclutar a una persona que más tarde viera un globo y quienes vieran un globo ellos mismos. Se aplica aquí el principio de presión social que resuelve las tragedias de los bienes comunes: favorecer el máximo uso de las redes sociales. Ganamos el concurso localizando los diez globos en solo nueve horas.

UN NUEVO ACUERDO SOBRE LOS DATOS

Para lograr una sociedad dirigida por datos necesitamos lo que he denominado el Nuevo Acuerdo sobre Datos. Este debe garantizar el fácil acceso a la información destinada a mejorar los bienes públicos sin dejar de proteger los derechos de la ciudadanía. La clave del acuerdo consiste en tratar los datos personales como un activo, sobre el que los individuos tengan derechos de propiedad. En 2007, propuse la siguiente analogía con la legislación inglesa común sobre posesión, uso y disfrute:

Usted tiene derecho a poseer los datos que le conciernen. Sea cual fuere la entidad que recoge los datos, estos le pertenecen y puede acceder a ellos en cualquier momento. Los entes que recopilan datos cumplen, pues, una función parecida a la de un banco, que gestiona la información en nombre de sus «clientes».

Usted tiene derecho al pleno control sobre el uso de sus datos. Las condiciones de uso deben ser autorizadas y estar claramente explicadas en un lenguaje llano. Si usted no está satisfecho sobre cómo utiliza sus datos el ente que los recopila, puede retirarle su custodia, igual que procedería al cerrar la cuenta de un banco que no le atiende bien.

Usted tiene derecho a disponer de sus datos o a distribuirlos. Está facultado para destruir o redistribuir los datos que le conciernen.

En el Foro Económico Mundial he intentado, durante los cinco últimos años, mediar en debates sobre estos derechos básicos entre políticos, altos ejecutivos de multinacionales y asociaciones públicas de la abogacía en EE.UU., la Unión Europea y el mundo entero. En consecuencia, las reglamentaciones (como los nuevos derechos de protección de la intimidad del consumidor en EE.UU.) ya están proporcionando un mayor control de los individuos sobre sus datos, al tiempo que fomentan una mayor transparencia y comprensión de las esferas pública y privada.

LABORATORIOS VIVOS

Por primera vez en la historia, sabemos sobre nosotros mismos lo suficiente para construir sistemas sociales que funcionen mejor que los que siempre tuvimos. Los macrodatos prometen guiarnos hacia una transición equiparable a la invención de la escritura o de Internet.

Desde luego, el salto hacia una sociedad dirigida por datos será todo un desafío. En un mundo con una cantidad inmensa de datos, ni siquiera puede aplicarse el método científico acostumbrado: hay tantas conexiones posibles que nuestras herramientas estadísticas normales a menudo dan resultados contradictorios. El enfoque científico habitual resulta adecuado cuando la hipótesis es clara y los datos están preparados para responder a una pregunta. Pero en la complejidad de las redes sociales a gran escala suele haber miles de hipótesis razonables, por lo que es imposible ajustar a la vez los datos de todas ellas. En esta nueva era tendremos que administrar de otro modo nuestra sociedad. Debemos empezar por analizar las conexiones con el mundo real mucho antes y con mayor frecuencia que nunca lo hubiéramos hecho. Necesitamos crear «laboratorios vivos» donde podamos ensayar nuestras ideas sobre cómo configurar sociedades dirigidas por datos.

Un ejemplo de tal laboratorio lo constituye la ciudad abierta que acabamos de establecer en Trento; en ella cooperan el Gobierno municipal, Telecom Italia, Telefónica, la fundación investigadora Bruno Kessler y el Instituto de Diseño Dirigido por Datos. El proyecto pretende promover una mayor circulación de ideas en Trento. Hay herramientas informáticas como nuestro sistema abierto de Almacén de Datos Personales (openPDS, por sus siglas en inglés), en el que se aplica el Nuevo Acuerdo sobre Datos. Estos programas permiten compartir con seguridad información privada, como la de la salud propia y la de los hijos, mediante el control del destino y uso de esa información. De este modo, existe una aplicación openPDS que ayuda a conocer los mejores hábitos entre las familias con niños pequeños. ¿En qué gastan su dinero otras familias? ¿Salen y alternan a menudo? ¿A qué escuelas y médicos infantiles asisten durante más tiempo? Cuando una persona concede su permiso, tales datos pueden recopilarse, convertirse en anónimos y compartirse con otras familias a través del openPDS de una manera segura y automática.

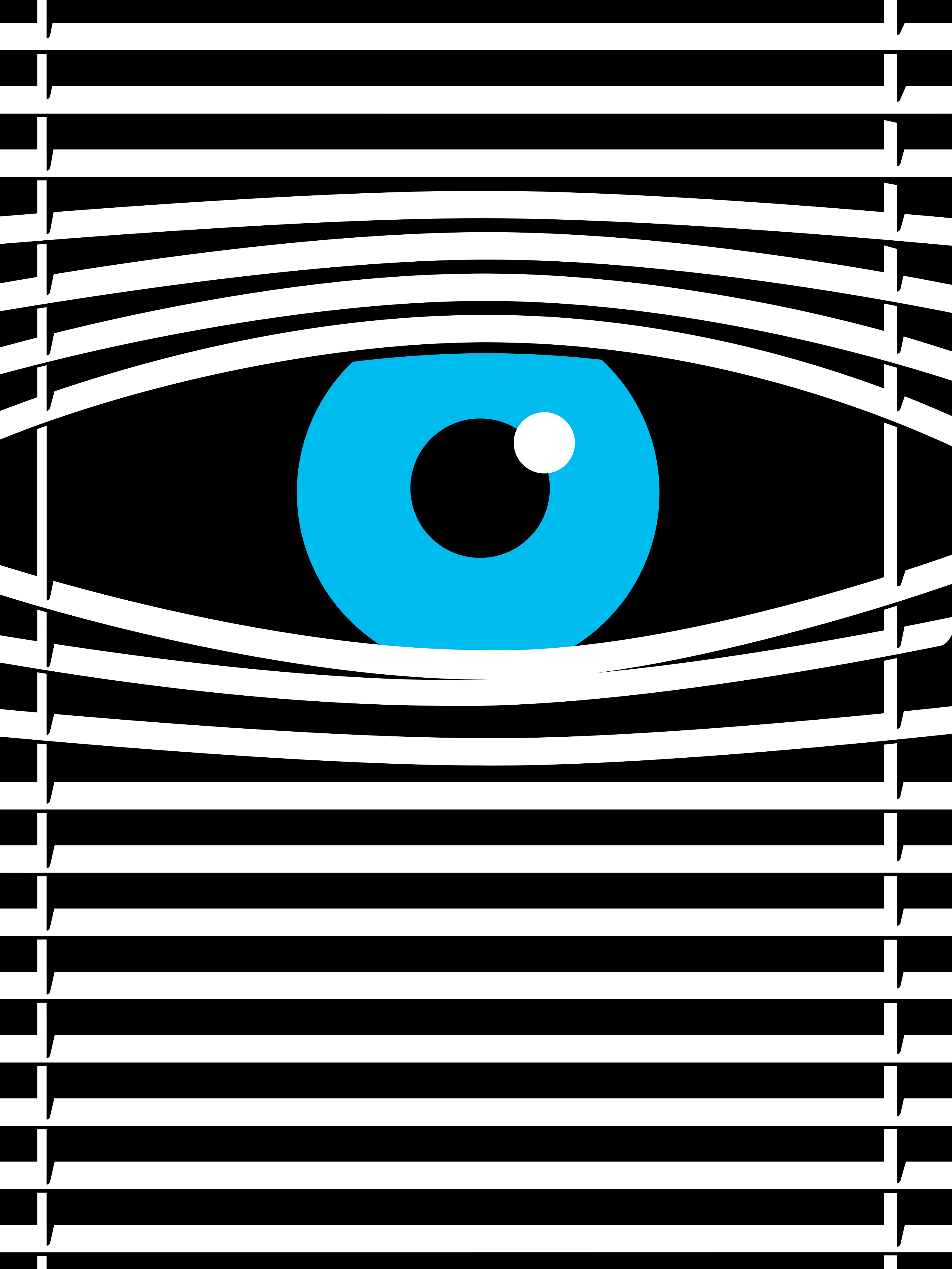
Creemos que experimentos como el acometido en Trento demostrarán que las posibles recompensas ofrecidas por una sociedad regida por datos merecen los esfuerzos y los riesgos incurridos. Podrían predecir y aliviar las crisis financieras, detectar y prevenir enfermedades infecciosas, aprovechar nuestros recursos naturales y fomentar el desarrollo de la creatividad. Este sueño podría tornarse pronto en realidad si avanzamos con cuidado de evitar los escollos ocultos.

PARA SABER MÁS

Society's nervous system: Building effective government, energy and public health systems. A. Pentland en *Computer*, vol. 45, n.º 1, págs. 31-38, enero de 2012.

Personal data: The emergence of a new asset class. World Economic Forum, enero de 2012. **www.weforum.org/reports/personal-data-emergence-new-asset-class**

The new science of building great teams. Alex «Sandy» Pentland en *Harvard Business Review*, abril de 2012.



CIENCIA Y SOCIEDAD

Nuevas concepciones de la privacidad

Un poco de luz sobre uno de los temas más espinosos de la era informática

Jaron Lanier

I. INFORMACIÓN IMPERFECTA

Un primer paso para elucidar un tema complejo o escurridizo consiste en centrarse en los hechos. En el caso de la privacidad, estos nos están vedados. Quienes han menguado nuestro ámbito privado, trátese de empresas o de organismos estatales, están decididos a que no restrinjamos el suyo. Por ejemplo, la Agencia de Seguridad Nacional de EE.UU. (NSA) lleva largo tiempo ocultando sus extensas operaciones de vigilancia electrónica. Ni siquiera tras las recientes filtraciones de Edward J. Snowden, el excontratista de la NSA, podemos hacernos sino una idea aproximada de lo que está ocurriendo.

No existe en el mundo actual ni un solo observador que posea una imagen completa de quién ha estado recopilando datos de quién. Ciertas organizaciones, como la NSA, saben sin duda mucho más que nadie, pero ni siquiera ella conoce toda la panoplia de algoritmos que entidades empresariales o gubernativas han aplicado a datos personales, ni para qué uso o finalidad.

La privacidad, por el momento, constituye un asunto tenebroso que solo es posible investigar de manera precientífica. Nos vemos obligados a depender de teorías, filosofías, introspecciones y anécdotas. Pero ello no impide que podamos pensar.

Jaron Lanier, informático de Microsoft Research, es conocido por sus aportaciones en el campo de la realidad virtual. Ha recibido numerosos doctorados *honoris causa* y otros títulos, entre ellos el Premio VGTC por la Trayectoria Profesional en Realidad Virtual del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. La revista *Time* le contó entre las 100 personas más influyentes del mundo. En los años ochenta, con veintitantos años de edad, sus trabajos fueron dos veces tema de portada en esa revista.



II. ¿QUÉ ES LA PRIVACIDAD?

Cada forma de entender la vida privada constituye un distintivo cultural. Al criarme en Nuevo México, tuve la oportunidad de pasar un verano con nativos de la tribu pueblo. Se quejaban de que los antropólogos, al revelar sus secretos, hubieran causado más destrozos en su cultura que los misioneros. Al propio tiempo, los estudiantes chinos venidos a EE.UU. irrumpían sin llamar en las habitaciones, y no podían entender que su comportamiento nos pareciera inadmisible. Eso ha cambiado, y también China.

En nuestros días, se oye decir que jóvenes e «infofrikis» cuidan menos su intimidad que sus mayores. Es probable que un adulto de cierta edad, criado y educado en un mundo sin ordenadores llevables, se sienta molesto si quien está frente a él lleva una cámara montada en la cabeza. Compañías como Facebook han recibido críticas —y también elogios— porque socializan a los jóvenes de modo que no les incomoden las actividades de la NSA u otras agencias de inteligencia. El grupo que más vigorosa y radicalmente promueve y defiende el respeto a la vida privada es tal vez el de poseedores de armas de fuego, quienes temen que su inclusión en una lista del Gobierno desemboque en la confiscación de sus armas.

Pese a la diversidad de actitudes sobre la privacidad, al debatir sus aspectos políticos se suele acabar hablando de soluciones de compromiso. Si el Estado, para detener a terroristas antes de que actúen, necesita analizar información personal de todos los ciudadanos, estos no tienen derecho a exigir a la vez seguridad y privacidad. O al menos, así es como suele plantearse la transacción.

En esta forma de razonar sobre la privacidad hay sesgo. Considerada en términos transaccionales, la privacidad acaba siendo tenida por un fetiche cultural aceptado, un refugio, un cubrelotodo para adultos. ¿En qué medida estamos dispuestos a «sacrificar» nuestra vida privada a cambio de ciertos beneficios? Implícita en esta formulación está la idea de que el respeto a la privacidad se haya convertido en un anacronismo, como el punto ciego de la retina del ojo humano. Viene a ser como preguntar cuán mal puede saber un medicamento para que un paciente acepte tragarlo para curarse de una enfermedad grave. Se sobreentiende que el enfermo tendría que dejarse de remilgos. Una opinión pareja sostiene que si nos inclináramos a compartir más datos podríamos disponer de más servicios o crear más valor en las redes en línea.

Resulta tentador desestimar los reparos individuales ante la pérdida de privacidad debido a la inconsistencia de estos. Pero podría tratarse de un error. ¿Y si fueran valiosas otras culturas o personas con una actitud distinta hacia la privacidad? La diversidad cultural, después de todo, debiera considerarse un bien intrínseco. Pensar de otro modo sería dar por supuesto que la cultura, las formas de pensar y los hábitos de información actuales resultan inmejorables, que cierta forma de tratar la privacidad es la única correcta. Ningún biólogo daría en pensar que la evolución ha tocado fin. Tal vez no haya que aplicar la misma ética de información a todo el mundo. Quizá debamos disponer de libertad para optar entre diversos grados de privacidad.

III. LA PRIVACIDAD ES PODER

En la era de la información, la privacidad se ha convertido, de manera ostensible, en datos disponibles para algunos e inaccesibles para otros. Poseerlos determinará en gran parte quiénes van a tomar los mandos.

La información siempre ha sido importante en las disputas por la riqueza y el poder, pero en nuestra era nada lo es tanto. La supremacía en ese ámbito resulta cada vez menos distinguible del dinero, la influencia política o cualquier otra medida de poder. Los más grandes proyectos financieros son computacionales: lo atestigua la marea de transacciones bursátiles de alta frecuencia. La informática a gran escala no solo ha beneficiado a alguna que otra empresa; también ha tenido efectos macroeconómicos al multiplicar el peso del sector financiero. Compañías como Google o Facebook no venden sino informática, diseñada para mejorar la eficacia de lo que seguimos llamando «publicidad», aunque esta voz tenga cada vez menos relación con la persuasión elegante o retórica. Ha dado, en cambio, en significar manipulación de la información que se presenta a la gente según convenga. Análogamente, las elecciones políticas actuales se basan en la computación a gran escala, que busca electores a quienes motivar para orientar su voto. La privacidad está en el meollo del equilibrio de poder entre el individuo y el Estado, y entre los intereses empresariales o políticos.

Tal situación implica que, a menos que los individuos logren proteger la esfera que les es propia, perderán poder. La defensa de ese espacio se ha convertido

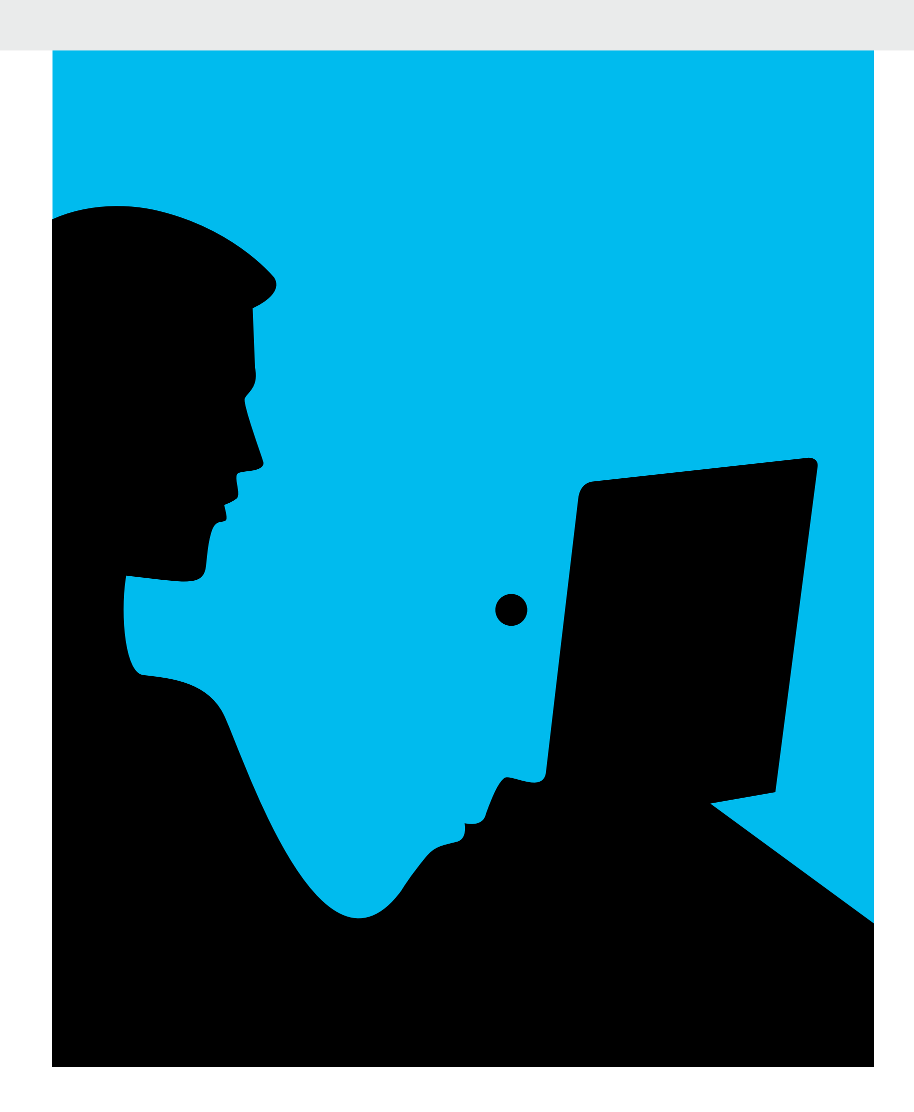
EN SÍNTESIS

La privacidad aún no ha desaparecido por completo. Pero las decisiones que hoy se tomen sobre su papel en nuestro mundo interconectado tendrán consecuencias durante decenios.

Debiéramos dejar de hablar de la privacidad en términos transaccionales, que sostienen que cuanta más privacidad sacrifiquemos más beneficios vamos a obtener (en seguridad, por ejemplo). Tales beneficios suelen exagerarse.

En lugar de imponer una única ética de privacidad para todo el mundo, debería permitirse que cada cual optase entre grados de privacidad variables.

Si la información personal fuese monetizada, cada uno tendría el control sobre sus propios datos y podría elegir su grado de privacidad. Los datos resultarían así demasiado caros para que empresas o Gobiernos los atesorasen de forma indiscriminada.



Facebook y sus competidores promueven la apertura y la transparencia, pero ocultan en sótanos profundos y tenebrosos los modelos predictivos de sus usuarios

en tarea personal y esencial, para la que la mayoría carece de preparación. Quienes saben de qué va, logran mantenerse un poco más a salvo (por ejemplo, evitando la suplantación de identidad). En consecuencia, la sociedad se ha sesgado a favor de cierta clase de personas de tendencias técnicas, no solo en el mercado laboral, sino también en la vida personal.

Algunos ciberactivistas abogan por la supresión de todos los secretos. Pero los jóvenes tecnólogos que cantan las excelencias de la compartición a menudo se obsesionan por desactivar los robots espía que pululan por la mayoría de los sitios web, o se valen de mensajes cifrados para comunicarse. En este aspecto, los jóvenes tecnólogos y las más grandes compañías de informática son parejos. Facebook y sus competidoras promueven entre los usuarios la transparencia y la apertura, pero ocultan los modelos predictivos de esos mismos usuarios en sótanos profundos y tenebrosos.

IV. LA AMENAZA ZOMBI

Estamos amenazados por una élite técnica de inusitada benevolencia. Quienes dirigen esas gigantescas compañías de informática en la nube, que proporcionan servicios modernos como las redes sociales o las búsquedas en la Red, son, en su mayoría, personas jóvenes y bienintencionadas. Y lo mismo vale para sus homólogos en los servicios de inteligencia. Podemos hacernos una idea de cómo podrían torcerse las cosas si imaginamos a estos amables tecnólogos trocados en viejos amargados, o vemos sus compañías en manos de futuros herederos, legítimos pero ignorantes. No hay que esforzarse mucho, porque tales supuestos han sido la regla a lo largo de la historia. Resulta descorazonador tener que considerar esta posibilidad cuando uno conoce a varios de esos afables expertos que medran en el huerto informático. Pero hemos de obligarnos a oscuros pensamientos si aspiramos a prever los posibles usos de esta tecnología.

Un observador que, provisto de un ordenador de potencia adecuada, lograse obtener suficiente información sobre una persona podría, al menos en teoría, anticipar y manipular los pensamientos y actos del sujeto observado. Tal vez los dispositivos conectados actuales no alcancen a tanto, pero los del mañana sí lo harán. Supongamos, pues, que una futura generación de electrónica de consumo toma la forma de un parche en la nuca conectado con el cerebro, el cual identifica, antes de percatarnos de ello, que estamos a punto de decidir a qué cafetería iremos.

Muchos de los componentes requeridos para crear ese tipo de servicios ya existen. En laboratorios como el de Jack Gallant, neurocientífico de la Universidad de California en Berkeley, se infiere lo que uno está viendo, imaginando o disponiéndose a decir mediante el análisis estadístico de macrodatos, en el que se correlacionan ciertas mediciones cerebrales actuales, obtenidas por resonancia magnética funcional, y las efectuadas en situaciones anteriores. Por así decirlo, la estadística ya permite una especie de «lectura de la mente».

Imaginemos ahora que llevamos puesto este dispositivo tan cómodo y estamos a punto de decidir ir a un café, aunque todavía no seamos conscientes de ello. Y supongamos que una entidad

(un Facebook o una NSA del futuro) tenga acceso a tal dispositivo y quiera disuadirnos de ir a la cafetería A y orientarnos hacia la B. Justo cuando estamos a punto de considerar la primera opción, recibimos un mensaje que nos fastidia y distrae, por lo que ni siquiera llegamos a plantearnos la idea de ir a la cafetería A. Mientras, un pensamiento sobre el café B libera desde un portal de citas un *tuit* sobre un plan atrayente. Nuestro humor mejora; súbitamente, el café B se nos antoja una excelente idea. Hemos sido víctimas de una manipulación neopavloviana, que ha tenido lugar por completo en una zona cerebral preconsciente.

La moraleja de este ejercicio de reflexión, de rancia prosapia en la ciencia ficción, es que la informática y la estadística unidas podrían remedar el control de la mente. Cabe imaginarse así un sistema semioficial de motores de recomendación, guiados desde la nube, que actúe sobre dispositivos portátiles cada vez más íntimos y, en los próximos años, nos haga andar parte del camino hacia el hipotético control mental recién descrito.

V. EPIDEMIA DE INCOMPETENCIA

En las historias de ciencia ficción, el argumento tradicional suele contar con un individuo malvado que se ha convertido en todopoderoso. En lugar de considerar tan negro futuro hipotético, me centraré aquí en un supuesto que no solo resulta más verosímil, sino que se ha manifestado ya en sus fases iniciales. No se trata de un plan perverso orquestado por malvados hiperinteligentes sino, más bien, de una difusa plaga de incompetencia.

En mi supuesto, una organización o sector económico dedicaría inmensos recursos a la manipulación algorítmica de las masas con el fin de obtener ganancias. Sin duda, tal proceder sería lucrativo al principio, pero acabaría en el absurdo. Ya se han dado ejemplos de ello. Véanse los masivos cálculos estadísticos que han posibilitado a las compañías de seguros médicos estadounidenses rechazar a quienes les suponían riesgos, una estrategia ventajosa a corto plazo hasta que el número de no asegurados se hizo insostenible. La sociedad hizo fracasar semejante plan. La destrucción algorítmica de la privacidad, entendida como medio para lograr riqueza y poder, acaba, según parece, en un inmenso atolladero.

Tomemos ahora el caso de las modernas finanzas. Los sistemas financieros basados en cómputos estadísticos a gran escala suelen tener éxito al principio. Con suficientes datos y capacidad de cálculo se puede extrapolar, durante algún tiempo, el futuro de unos títulos, la conducta de una persona y, de hecho, cualquier fenómeno que varíe sin brusquedades. Pero los planes basados en macrodatos acaban fallando, por la sencilla razón de que las estadísticas, por sí solas, nunca podrán reflejar sino un fragmento de la realidad.

Hasta comienzos del siglo XXI, las estrategias financieras que se servían de grandes conjuntos de datos no invadían la privacidad de las personas (para modelizar, póngase por caso, individuos y ofrecerles créditos o hipotecas descabellados). Eran más abstractas. Los valores y las inversiones se modelizaban de forma automática, sin conocer sus resultados en el mundo real. Uno de los primeros ejemplos fue un fondo de cobertura, o de alto riesgo, llamado Long-Term Capital Management, con sede en Greenwich, Connecticut. Tras subir como la espuma, se desplomó en 1998 y obligó a un formidable rescate a cargo de los contribuyentes. (Los sistemas de negociación de alta frecuencia están retomando la misma senda, solo que con muchos más datos y computación más veloz). Ahora, sin embargo, gran parte de las finanzas altamente automatizadas se basan en una pérdida de privacidad individual a gran escala, la misma que caracteriza el arte del espionaje o la Internet orientada al consumo. Por último, las especulaciones en valores supuestamente avalados por hipotecas, que desembocaron en la gran crisis económica actual, unieron la vulneración de la privacidad personal con los sistemas de negociación automática.



La consecuencia ha sido otro rescate de proporciones cósmicas, a expensas públicas, al que seguirán, no se dude, otros rescates futuros.

No se trata, pues, de que una élite ultracompetente se esté apoderando del mundo. Por el contrario, sucede que a todos, incluidos los operadores de mayor éxito de los gigantescos servicios en la nube, les cuesta entender lo que ocurre. La vulneración de la privacidad del prójimo funciona al principio y crea fortunas a base de informática, pero acaba en fracaso. Esta pauta ha provocado ya varias crisis financieras. En el futuro, si quienes gestionen los ordenadores más potentes y dispongan de más datos personales logran un mayor grado de predicción y manipulación del colectivo social que sus competidores, las consecuencias podrían ser aún más temibles.

VI. LA AUTÉNTICA MEDIDA DE LOS MACRODATOS

Quienes tratan de vender las capacidades de un servicio de recopilación y análisis de enormes conjuntos de datos personales a menudo profieren absurdas baladronadas. Una de ellas es: «Dentro de poco, si no ocurre ya, ordenadores colosales podrán predecir y orientar con tal perfección el comportamiento de los consumidores que hacer negocio será como pulsar un botón. Ese gran ordenador atraerá el dinero como el imán a las limaduras».

También presencié la declaración de una empresa recién nacida de Silicon Valley que, con la esperanza de ser adquirida por alguna compañía de primera división, afirmó poder averiguar el ciclo menstrual de una mujer analizando los enlaces que iba pinchando en la Red. La empresa dijo que tal información podría emplearse para venderle a esa persona productos de moda o cosméticos en los intervalos de su ciclo en que fuese más susceptible a envites publicitarios. Tal estrategia podría servir en cierta medida, pero como se funda puramente en estadísticas, sin una teoría científica que lo avale, resulta imposible conocer en qué grado.

De igual modo, al vender un sistema que recopila información sobre ciudadanos, una agencia gubernamental —o más verosímilmente, un contratista privado al servicio de la agencia— podría lanzar pintorescas declaraciones sobre la posibilidad de atrapar a delincuentes o terroristas antes de que actuaran, a base de escrutar y analizar a todo el mundo. La terminología de tales programas, como el *Total Information Awareness* («conocimiento total de la información»), revela el deseo de disponer de un ojo divino que todo lo vea.

Esta posibilidad lleva decenios en la ciencia ficción. Un ejemplo es la «unidad precriminal» de *Minority Report*, película basada en un cuento de Philip K. Dick, a la que contribuí hace varios años con alguna idea. La unidad atrapaba a los delincuentes antes de que pudieran actuar. Pero dejémoslo claro: los gigantescos sistemas de recopilación y análisis de datos no hacen lo mismo.

Los creadores de tales sistemas confían en que algún día los metadatos soporten una megaversión de los algoritmos del tipo de «autocompletar», que vaticinan lo que vamos a teclear en nuestros teléfonos inteligentes. Los algoritmos estadísticos permitirán llenar las lagunas que pueda haber en los datos. Por medio de ellos, el estudio de los metadatos de una organización criminal debería conducirnos hasta miembros clave nuevos, hasta entonces desconocidos.

Se está recopilando y analizando una pasmosa cantidad de información sobre nuestras vidas privadas, y se está actuando a partir de ella antes de demostrarse la validez de su uso

Pero a día de hoy, que se sepa, no hay pruebas de que la minería de metadatos haya prevenido ninguna acción terrorista. En todos los casos conocidos, ha sido la inteligencia humana la promotora de investigaciones directas que llevaron hasta los sospechosos. De hecho, cuando los funcionarios responsables de los gigantescos proyectos de informática en la nube, tanto privados como gubernamentales, explican lo que hacen, sus descripciones no se sostienen, sobre todo si se examinan con atención. Es cierto que si se tienen indicios de un posible complot terrorista resulta más fácil atar cabos con la ayuda de una base de datos colosal. Pero esta no podrá identificar primero las pistas.

En nuestros días abunda cierta forma de ilusionismo de salón, como los análisis posteriores a los acontecimientos históricos. Estos pretenden demostrar que, con datos suficientes, se habrían detectado individuos clave en complots antes de que se produjeran. Así, el análisis algorítmico de coetáneos de Paul Revere revela que este era una figura central de una red social. En este caso, los datos se basan en su pertenencia a diversas organizaciones antes de la Guerra de Independencia de los EE.UU. Shin-Kap, sociólogo de la Universidad Nacional de Seúl, ha demostrado, mediante el análisis de una pequeña base de datos de afiliación a diversas organizaciones anteriores a la guerra, que Revere se singulariza como figura de conexión. Más recientemente, Kieran Healy, sociólogo de la Universidad Duke, ha deducido resultados similares a partir de otra base de datos representativa de los mismos sucesos.

No podía fallar: he ahí a Paul Revere, en mitad de los nodos que agrupan a otros individuos. Tales resultados animan a aplicar los metadatos a cuestiones de seguridad colectiva. Sin embargo, deben considerarse otras variables antes de convencerse de la utilidad de tales investigaciones para predecir acontecimientos.

Revere se hallaba sin duda en una situación que le hacía fundamental en algún aspecto. Sin embargo, sin un contexto histórico, no podríamos saber

cuál. Un individuo capaz de suministrar excelentes cervezas ocuparía una centralidad similar. Los metadatos solo cobran sentido si están contextualizados con otras fuentes de información. No es posible comprender un fenómeno solo a partir de estadísticas y gráficos, aunque así lo parezca durante un breve plazo.

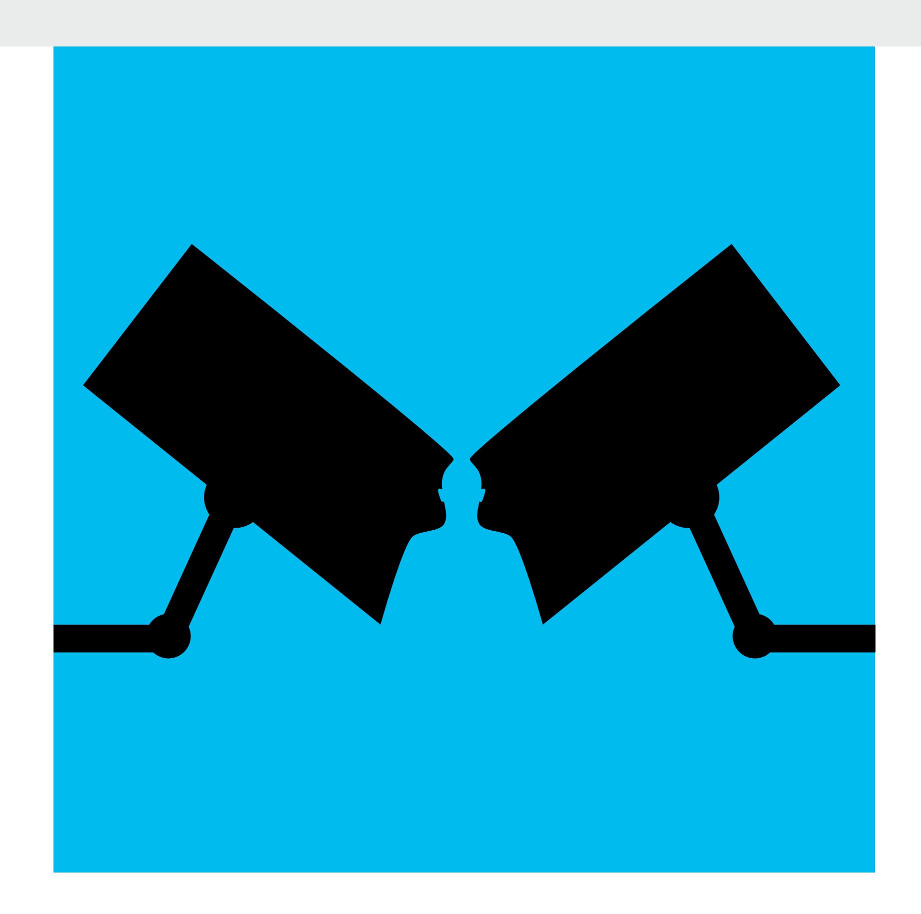
El peligro reside en creer que el análisis estadístico de macrodatos nos proporcione un sistema automático de generación de seguridad, algo así como lo ocurrido con las ilusorias máquinas de crear riqueza de Wall Street. Se está recopilando y analizando una pasmosa cantidad de información sobre nuestras vidas privadas, y se está actuando a partir de ella antes de demostrarse la validez de su uso.

VII. EL *SOFTWARE* ES LA LEY

A menudo se oyen asertos como «Internet y los numerosos dispositivos nuevos que se comunican a través de ella convertirán la esfera individual en cosa del pasado». Pero no ha de ser necesariamente así. La tecnología de la información se basa en avances técnicos, no en el descubrimiento.

Es verdad que una vez establecida la arquitectura de una red, con un sinfín de usuarios y ordenadores interconectados que dependen de ella, resulta difícil introducir cambios. La arquitectura queda «cerrada por dentro». Sin embargo, la naturaleza de la privacidad en nuestras redes digitales no está bloqueada del todo. Todavía tenemos opciones para elegir lo que queremos. Cuando se habla del gran compromiso entre privacidad y seguridad, o entre privacidad y servicios, se da a entender que este resulta inevitable. Es como si hubiéramos olvidado lo más esencial de los ordenadores: que son programables.

Dado que los programas son el medio por el que las personas se conectan y realizan operaciones, lo permitido es lo que los programas permiten, mientras que lo que estos no pueden hacer, no se puede hacer. Esta obviedad es particularmente aplicable a las disposiciones de los Gobiernos. Según la Ley de Sanidad Asequible, conocida como *Obamacare*, los fumadores de ciertos estados tendrían que sufrir, en teoría, recargos en su seguro médico. La razón de que solo sea «en teoría» se debe a que los programas de gestión del nuevo marco legal para la financiación sanitaria no contemplaron, al ser confeccionados, la penalización a fumadores. Así



La naturaleza de la privacidad en nuestras redes digitales no está bloqueada del todo. Todavía tenemos opciones para elegir lo que queremos

que la ley tendrá que entrar en vigor sin los recargos y esperar a que en un momento futuro el programa sea redactado de nuevo. Sobre esta ley puede cada uno opinar lo que quiera, pero será la informática la que determinará su aplicación.

El ejemplo del recargo a los fumadores apunta a una cuestión de más fuste. Las limitaciones o fallos en el *software* del *Obamacare*, o de cualquier otro proyecto a escala social, podrían tener efectos más decisivos sobre los individuos que las propuestas de los políticos.

VIII. CÓMO DISEÑAR EL FUTURO

Hay dos escuelas principales de pensamiento sobre cómo sacar provecho de los macrodatos sin provocar excesivas infracciones a la privacidad. Una de ellas ambiciona articular y hacer cumplir una nueva normativa legal. La otra busca alentar una transparencia universal, de modo que todos puedan acceder a todos los datos para que nadie adquiera ventajas indebidas. Ambas líneas se hallan, en casi todo, en polos opuestos.

Lo malo de las leyes de privacidad es que difícilmente se van a respetar. El análisis estadístico de los datos se torna adictivo, y las normas sobre la privacidad se asemejarían a la prohibición del alcohol o las drogas. Uno de los aspectos desalentadores de las filtraciones periódicas relativas a la NSA es que

incluso los reglamentos sobre secretos oficiales asumidos por la organización parecen fútiles. De este modo, los funcionarios de la NSA se han valido de sus privilegiados observatorios para espiar intereses amorosos. No obstante, introducir nuevas normas y supervisarlas tal vez serviría de algo.

¿Qué decir de la idea contraria, facilitar el acceso a los datos? El inconveniente de tal estrategia radica en que no solo importa el acceso a los datos. Importa más la potencia informática empleada para analizarlos. Siempre habrá alguien que posea el ordenador más eficaz, y probablemente no seremos nosotros. La apertura, en abstracto, no hace sino agudizar el problema, porque refuerza el incentivo para disponer del ordenador más potente.

Llevemos a un caso límite el ideal de apertura. Supongamos que mañana la NSA hiciera públicas todas las claves de sus servidores y cuentas, y que cualquiera pudiera examinar sus contenidos. Google y sus competidores procederían a extraer, indexar y analizar la inmensidad de datos almacenados por la NSA mucho antes y mejor que ninguno de nosotros; y estarían encantados de cobrarles fortunas a clientes prestos a valerse de ese trabajo para hallar un medio de manipular el mundo en su beneficio. El de ellos, no el nuestro. Recuérdese que los datos, en bruto, no dan poder. Lo confieren la suma de los macrodatos y los ordenadores más potentes y mejor programados, que no se hallan a nuestro alcance.

¿Cabe una tercera vía? Según una opinión defendida de forma casi universal, la información debe ser gratuita, no debe pagarse por ella. Tal presunción ha permitido el raudo ascenso de las grandes compañías en línea, como las de Silicon Valley.

Vale la pena reconsiderar esta ortodoxia. Nuestra situación podría quedar más clara haciendo que la información poseyera valor comercial, lo que introduciría un elemento de individualidad, diversidad y sutileza a las cuestiones de privacidad.

Si se pagase a las personas por utilizar informaciones relativas a su existencia, se reduciría el deseo de crear sistemas masivos de recopilación de datos, que están condenados al fracaso. Un sistema basado en datos tendría que ganar dinero aportando valor a la información que los individuos poseen, en vez de utilizarla contra ellos.

Se trata de una idea delicada que he estado explorando en colaboración con el Centro de Investigación Palo Alto, con W. Brian Arthur, economista del Instituto Santa Fe, y Eric Huang, de la Universidad Stanford. Huang ha aplicado los modelos más aceptados en el sector de seguros para ver qué ocurre si se pone precio a la información. Un resultado general es que, si las aseguradoras tuvieran que pagar a los individuos por sus datos, no podrían ser tan selectivos y tendrían que atender a personas que de otro modo quedarían sin asegurar.

Importa subrayar que no hablamos de redistribuir los beneficios de los peces gordos hacia los peces chicos; se trata, en cambio, de un juego de suma positiva, en el que todos salen ganando al aumentar la estabilidad y crecimiento económicos. Además, resulta inconcebible que una inspección oficial pueda garantizar la observancia de las normas sobre privacidad; pero quizás el mismo ejército de auditores privados que en nuestros días hacen viables los mercados pudiera asumir tal papel.

Tratada la información como un bien con valor comercial, los mismos principios que inspiran los códigos de comercio podrían resolver los dilemas relativos a la privacidad, de otro modo imponderables. En el mundo en que vivimos, si no se poseen importantes destrezas técnicas es muy difícil crear para sí mismo un grado intermedio de privacidad. A una persona no técnica que ingrese en una red social puede resultarle complicado gestionar sus ajustes de privacidad. Sin embargo, en un mundo de información pagada, esta persona podría subir o bajar el precio de sus datos y hallar un valor adecuado. No se requiere más que el ajuste de un único número, un precio.

¿Que alguien quiere tomar una foto nuestra mediante una cámara montada en la cabeza? En abstracto, podría hacerlo, pero mirar realmente la foto, hacer algo con ella, podría suponerle un coste prohibitivo. Los individuos podrían perder ciertas ventajas si exigen precios demasiado altos por su información, pero este sería uno de los medios en que podría manifestarse la diversidad cultural, incluso aunque por todas partes haya sensores conectados a las grandes compañías.

Existe también una faceta política: cuando la información es gratuita, el Gobierno resulta financiado de sobra como espía de sus ciudadanos, porque estos pierden poder monetario como medio de controlar al Gobierno. Póngase precio a la información, y la población podrá decidir cuánto espionaje puede permitirse el Gobierno sin más que un ajuste en la tasa impositiva.

Esta exposición sucinta solo apunta a la idea de la información pagada, y muchas serían las cuestiones que aclarar incluso si dispusiera de más páginas. Pero lo mismo vale para las alternativas. Por ahora no existe, en la era de la gran informática, ninguna idea madura para resolver el problema de la privacidad, ni la propuesta de una apertura radical ni la de una nueva legislación.

Es de suma importancia analizar todas las ideas puestas sobre la mesa. Los ingenieros de redes deberemos también construir en cualquier sistema de *software* tantos «ganchos» (*hooks*) como sea posible, lleguen a utilizarse o no, para que los programas de red puedan acoger futuras ideas, bien sea la información pagada, una regulación más estricta o la apertura universal. No debemos descartar nada si podemos.

Los que construimos sistemas de macrodatos y los dispositivos que los conectan nos encaramos a una situación delicada, que irá en aumento al progresar la tecnología. La informática masiva puede hacer que nuestro mundo resulte más sano, eficiente y sostenible. Pero hemos de tener presente que no sabemos lo bastante para acertar a la primera. Debemos aprender a obrar como si nuestro trabajo fuera siempre un primer borrador; esforzarnos al máximo por sentar unos cimientos que puedan ser modificados o, incluso, construidos de nuevo.

PARA SABER MÁS

The nature of technology: What it is and how it evolves. W. Brian Arthur. Free Press, 2009.
You are not a gadget. Jaron Lanier. Knopf, 2010.
Who owns the future? Jaron Lanier. Simon & Schuster, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Privacidad. Por VV.AA. en *IyC*, noviembre de 2008 (*número monográfico*).

PSICOLOGÍA

¿Está Google cambiando nuestra mente?

Daniel M. Wegner y Adrian F. Ward

Los humanos hemos estado milenios dependiendo unos de otros para recordar los detalles de la vida diaria.

Ahora nos fiamos de «la nube», lo que está cambiando la percepción del mundo que nos rodea

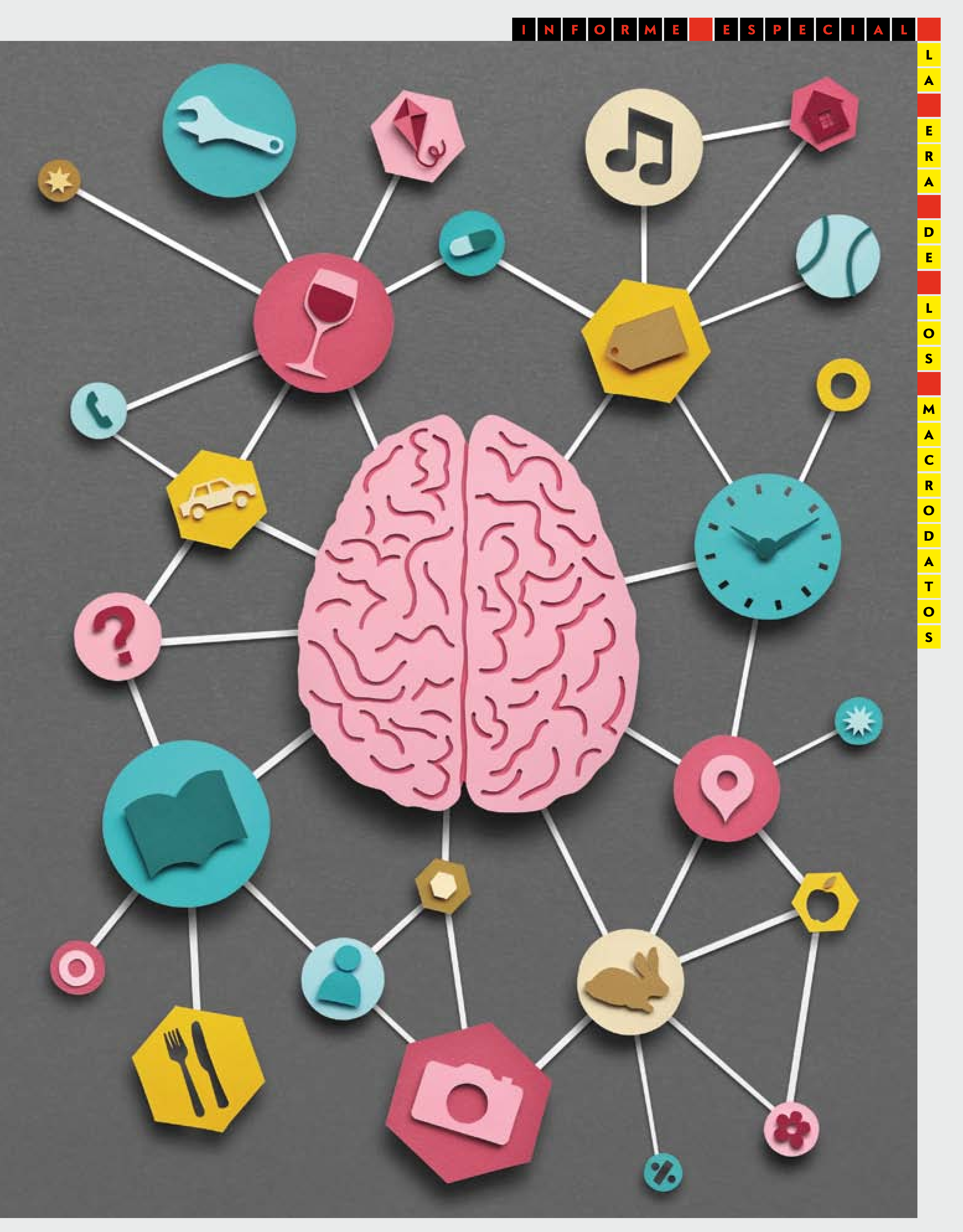
Una pareja es invitada a un cumpleaños. Por experiencia previa, cada uno de los dos sabe intuitivamente de qué ha de encargarse. Uno averigua si habrá que vestirse de manera formal o informal; el otro toma nota mental de la hora y lugar de la reunión, para que a ninguno se le olvide.

Todos, en alguna medida, delegamos en otros ciertas tareas. Cuando nos presentan información nueva, automáticamente hacemos responsables de recordar hechos y conceptos a otros miembros de nuestro grupo social; mientras nos ocupamos de algunas cosas, confiamos en que otras personas recuerden el resto. Si no logramos dar con el nombre correcto o no sabemos arreglar un aparato averiado, recurriremos a quienes sí lo puedan hacer. ¿Que nuestro coche hace ruidos raros? Consultamos a un mecánico amigo. ¿No conseguimos acordarnos del nombre de la protagonista de *Casablanca*? Telefoneamos a Marina, entusiasta cinéfila, que lo sabe a buen seguro. Todos los tipos de conocimiento, desde los más prosaicos a los más arcanos, están repartidos entre miembros del grupo, sea la unidad social en cuestión una pareja estable o el departamento de contabilidad de una multinacional. En cada caso, no solo conocemos la información que alberga nuestra propia mente; «sabemos» también las diversas clases de información que les han sido confiadas a otros para que las recuerden.

Esa división evita innecesarias duplicaciones de esfuerzos y permite ampliar la capacidad de memoria del grupo en su conjunto. Al descargar en otros ciertas informaciones, liberamos recursos cognitivos que habrían de ser utilizados para recordarlas; a cambio, aprovechamos parte de esos recursos para profundizar más en el conocimiento de las áreas que nos están encomendadas. Si los miembros de un grupo comparten la responsabilidad de la información, cada uno tiene acceso a conocimientos más amplios y completos que los que podría obtener por sí solo. La memoria distribuida crea cohesión en el grupo, pues cada individuo se halla incompleto si no puede apoyarse en el saber poseído entre todos. La pareja del cumpleaños por separado podría hacerse un lío: uno de ellos, despistado, iría por las calles vestido para un cóctel, mientras que el otro llegaría puntual luciendo una sudadera.

La tendencia a distribuir información mediante lo que denominamos sistema de memoria transactiva se desarrolló en un mundo de interacciones personales, cara a cara, en el que la mente humana ejercía una función primordial a la hora de almacenar conocimientos. Pero tal mundo ya no existe. Con el

OWEN GILDERSLEEVE



desarrollo de Internet, la mente ha perdido protagonismo.

Basta invitar a Siri, la aplicación de iPhone, a un grupo social para que todo cambie. El trabajo que hemos realizado lleva a pensar que concedemos a Internet un trato muy similar al que recibiría un asociado humano de memoria transactiva. Depositamos recuerdos en la nube con tanta naturalidad como lo haríamos con un familiar, un amigo o un amor. Pero Internet no se parece a un socio de memoria transactiva; sabe más y puede presentar la información en menos tiempo. En nuestros días, casi todos los datos son fácilmente accesibles mediante una rápida búsqueda en Internet. Puede que la Red no solo esté ocupando el lugar de otras personas en cuanto a fuentes externas de recuerdos, sino también el de nuestras facultades cognitivas. Quizás elimine la necesidad de compartir información con otros, además de reducir la tendencia a inscribir en nuestra memoria biológica ciertos datos importantes recién aprendidos. Es lo que llamamos efecto Google.



Daniel M. Wegner ocupó la cátedra John Lidsley de psicología en la Universidad Harvard. Estudió, entre otras cuestiones, la supresión del pensamiento y la memoria transactiva. Falleció en julio pasado, tras una larga enfermedad. La Sociedad Estadounidense de Psicología manifestaba en su obituario: «Su recuerdo pervivirá, no solo por la amplitud y originalidad de su contribución a la ciencia psicológica, sino también por el evidente gozo que le producían sus investigaciones, que impartía a sus estudiantes, y por sus escritos».



Adrian F. Ward se doctoró en psicología en Harvard. Su tesis doctoral, dirigida por Wegner, trataba de la difuminación de las fronteras entre Internet y el yo. En la actualidad es investigador de la Universidad de Colorado en Boulder.

UN NUEVO ASOCIADO

En un experimento reciente, nuestro grupo ha demostrado hasta qué punto está Internet empezando a suplantar a amigos o familiares en el rol de socios para la recordación de asuntos corrientes. Betsy Sparrow, de la Universidad de Columbia, Jenny Liu, entonces en la Universidad de Wisconsin en Madison, y uno de nosotros (Wegner) solicitamos a voluntarios que copiasen en un ordenador 40 informaciones o hechos curiosos, del jaez de «El ojo del avestruz es mayor que su cerebro». A la mitad de los participantes se les dijo que su trabajo sería guardado en el ordenador; a la otra, que sería borrado. Además, se les pidió a unos y otros que recordasen la información, tanto si iba a ser guardada en el ordenador como si no.

Observamos que quienes confiaban en haber registrado los datos en el ordenador fallaban mucho más al ser interrogados. Parecían tratar la computadora como a los socios de memoria transactiva que empezamos a estudiar hace decenios. Descargaban la información en esa «mente» en la nube, en lugar de almacenarla en la suya. Curiosamente, esta tendencia persistió incluso cuando los participantes fueron instados a memorizar los datos. Al parecer, la propensión a liberarse de información y depositarla en medios digitales es tan fuerte que, cuando existe un «cibercolega», a las personas les cuesta fijar los detalles en sus propios pensamientos.

Otro de nuestros experimentos se propuso comprobar cuánto tardamos en recurrir a Internet cuando intentamos responder a una pregunta. Nos valimos, a este fin, de una tarea conocida en psicología por prueba de Stroop, en la que los probandos ven una serie de palabras escritas en distintos colores y deben decir el color de cada una, sin preocuparse de su significado [*véase* «Efecto Stroop. Una colorida trampa verbal», por Rainer Rosenzweig; MENTE Y CEREBRO n.º 47, 2011]. El tiempo que una persona tarda en identificar el color indica el grado en que ha captado su atención la palabra. Si la respuesta es lenta, se supone que el significado de la palabra guarda relación con algo que el sujeto está pensando. De este modo, los voluntarios que no probaron bocado durante 24 horas tardaron más que los saciados en mencionar el color del nombre de cierto alimento. Como las palabras relativas a la comida les interesaban mucho, dadas sus necesidades del momento, les resultaba casi imposible ignorarlas, y los tiempos de reacción aumentaron.

En nuestro experimento, los participantes realizaron dos pruebas de Stroop: una tras responder preguntas sobre asuntos triviales y otra después de intentarlo con preguntas difíciles. Las palabras de ambas pruebas hacían referencia bien a Internet (Google, en letras rojas, o Yahoo, en azul) o a marcas comerciales generales (Nike, en amarillo, o Target, en verde), entre otras.

UN AMIGO SABELOTODO

Observamos un efecto curioso tras las preguntas que los participantes no sabían responder sin ayuda, tales como «¿Tienen al menos dos colores las banderas de todos los países?». Los sujetos se demoraron al decir el color de las palabras relacionadas con Internet, pero no el correspondiente a marcas conocidas. Al parecer, cuando nos enfrentamos a peticiones de datos que ignoramos, nuestro primer impulso es recurrir a Internet, el «amigo» sabelotodo que nos los proporciona sin que nos esforcemos. Basta con un toque en una pantalla o una petición verbal. Al ir traspasando a la Red la responsabilidad de numerosas informaciones, tal vez estemos reemplazando a posibles socios de memoria transactiva de naturaleza humana, trátese de amigos, familiares o expertos, con nuestra continua conexión a una nube digital, al parecer, omnisciencia.

Esa transición en la diseminación de información, desde los miembros de una red social de memoria transactiva (ami-

EN SÍNTESIS

Tradicionalmente, la recordación ha constituido una tarea social. Ciertas personas saben preparar lubina a la espalda; otras, reparar el grifo del lavabo.

Internet lo cambia todo. Al ser casi ubicuo el acceso en línea, antes de llamar a un amigo muchas personas prefieren empezar por una búsqueda en la Red.

La conexión permanente a la Red modifica la percepción subjetiva de uno mismo, al irse difuminando la frontera entre los recuerdos personales y la información repartida por Internet.

gos, familiares, colegas) hasta la nube informática, parece lógica. A primera vista, los petaoctetos dispersos por Internet guardan cierta semejanza con lo que recuerda una amistad. Internet almacena información, la recupera en respuesta a nuestras preguntas e incluso interactúa con nosotros de forma sorprendentemente humana, al acordarse de nuestro cumpleaños o responder a órdenes verbales.

En otros aspectos, sin embargo, Internet no se parece a nadie que hayamos conocido: se halla presente en todo momento y lo sabe casi todo. La información accesible desde un teléfono inteligente tiene un alcance inmensamente mayor que la que pueda albergar persona alguna y, a menudo, que la poseída por grupos enteros. Está siempre al día y, descartado un apagón general, no sufre las deformaciones y olvidos que afligen a los viejos recuerdos arrinconados en la mente.

La asombrosa eficacia de Internet contrasta sin duda con los métodos de búsqueda más antiguos. Pedir información a los amigos exige localizarlos, confiar en que posean los datos requeridos y esperar tosecitas, carraspeos y aclarados de voz mientras hurgan en sus recuerdos en pos de la respuesta. Análogamente, buscar información en un libro puede suponer la visita a una biblioteca, consultar el catálogo de fichas y dar vueltas entre las estanterías hasta dar con el material deseado. El acto mismo de solicitar un dato a un amigo o averiguarlo en un libro subraya nuestra dependencia de fuentes de información externas.

Google y Wikipedia han transformado esa situación. La distinción entre lo interno y lo externo (entre lo que reside en nuestra mente y lo que sabe un amigo) cambia por completo cuando la confidente es Internet. A veces, obtenemos con ella la información antes que si recurriésemos a nuestros recuerdos. La inmediatez con que un algoritmo de búsqueda proyecta datos en la pantalla de un teléfono inteligente puede empezar a difuminar las fronteras entre nuestros recuerdos personales y los vastos tesoros digitales repartidos por Internet. En tiempo reciente hemos realizado experimentos en la Universidad Harvard para verificar en qué medida las personas incorporan Internet como una percepción subjetiva de sí mismas. Intentamos averiguar, una vez más, el modo en que nuestros pensamientos se orientan hacia ingenios de búsqueda cuando se nos formula una pregunta difícil. Antes de realizar el estudio, ideamos una escala para medir cómo valoran los sujetos su capacidad para evocar los propios recuerdos. Así, de un probando que considerase acertados los asertos «Soy inteligente» y «Tengo buena memoria» se podría decir que posee una elevada autoestima cognitiva.

A veces, la información obtenida en Internet llega antes que la evocada desde nuestros propios recuerdos

A continuación, indicamos a nuestros voluntarios que respondieran a varias preguntas, con o sin ayuda de Google, y les pedimos que se calificasen a sí mismos en nuestra escala. La autoestima cognitiva resultó notablemente mayor en quienes acababan de usar Internet para buscar la solución. De modo sorprendente, aunque las respuestas se habían tomado palabra por palabra de una página web, los probandos tenían la ilusión de que sus propias facultades mentales, y no Google, habían producido tal información.

Para asegurarnos de que los probandos no se habían sentido más listos por la simple razón de haber logrado más aciertos con la ayuda de Google, llevamos a cabo otro experimento afín: a quienes no habían utilizado el buscador se les aseguró, falazmente, que habían dado respuestas correctas a casi todas las preguntas. Pero incluso cuando los probandos de ambos grupos creyeron haber respondido igual de bien, quienes se valieron de Internet declararon sentirse más inteligentes.

Estos resultados apuntan a que el aumento de la autoestima cognitiva no solo se debe al refuerzo de saber que se ha acertado. Más bien ocurre que el empleo de Google hace sentir al usuario como si Internet formase parte de sus capacidades cognitivas. El resultado de una búsqueda no fue evocado como una fecha o un nombre tomados de una página web, sino como un producto del propio saber del probando, lo que le permitía atribuirse el mérito de poseer conocimientos que eran, de hecho, fruto de algoritmos de Google. El efecto psicológico de este reparto equitativo de recuerdos entre Internet y la materia gris de nuestro cerebro presenta una ironía. El advenimiento de la era de la información parece haber creado una generación convencida de saber más que nunca, cuando su dependencia de Internet pudiera implicar que tal vez conozca cada vez menos del mundo que la rodea.

No obstante, a medida que nos integremos en la «Intermente» quizá desarrollemos una nueva inteligencia que ya no esté anclada a los meros recuerdos locales que se albergan solo en nuestra mente. Tal vez, al irnos librando de la necesidad de recordar hechos, podamos, como individuos, aplicar a empresas ambiciosas los recursos mentales de los que entonces dispondríamos. Quién sabe si la «Intermente» conseguirá articular la creatividad de la mente humana con la vastedad de conocimientos asentados en Internet para crear un mundo mejor y remediar algunos de los muchos desaguisados que hemos cometido hasta ahora.

Conforme los progresos en informática y transferencia de datos difuminen las fronteras entre la mente y las máquinas, se podrán ir superando las limitaciones de la memoria y el pensamiento impuestas por las deficiencias de la cognición humana. Ello no tiene que implicar la pérdida de nuestra identidad. Estaríamos, simplemente, fundiendo el yo con algo más grande para formar una asociación transactiva no solo con otras personas, sino con la fuente de información más fecunda que nunca haya existido.

PARA SABER MÁS

Transactive memory: A contemporary analysis of the group mind. Daniel M. Wegner en *Theories of group behavior*. Compilación de Brian Mullen y George R. Goethals. Springer, 1986.

Google effects on memory: Cognitive consequences of having information at our fingertips. Betsy Sparrow et al. en *Science*, vol. 333, págs. 776-778, 5 de agosto de 2011.



MEMORIAS DEL FUTURO

Las memorias digitales modernas se acercan a sus límites. ¿Cómo almacenar el diluvio de información que se avecina?

Luca Perniola

EN 2012 SE FABRICARON MÁS MICROCHIPS DE MEMORIA QUE GRANOS DE ARROZ SE CULTIVARON EN TODO EL PLANETA.

Semejante producción resulta indispensable para procesar y almacenar la enorme cantidad de datos característica de nuestros días: se calcula que, en 2007, se transmitieron unos $2 \cdot 10^{12}$ gigaoctetos, cifra que aumenta cada año a un ritmo considerable. ¿Podrán los dispositivos actuales asimilar ese crecimiento? Tal objetivo no solo exige una descomunal capacidad de almacenamiento de datos, sino dispositivos que permitan recuperar la información con rapidez. A fin de afrontar ese reto, numerosos laboratorios investigan el desarrollo de nuevas memorias digitales, con mejores prestaciones y no tan costosas.

La necesidad de conservar la información data de muy antiguo en la historia de la humanidad. Los primeros soportes, como las tablillas de arcilla, los pergaminos o los libros, fueron analógicos. Sin embargo, uno de sus principales defectos residía en su gran volumen. Esa situación dio un vuelco con la llegada de la era digital. Hoy en día, cualquier conjunto de datos (música, texto, imágenes u otros) puede almacenarse en secuencias de bits: ristras de ceros y unos que, entre otras ventajas, ofrecen un importante ahorro de espacio, un tratamiento automatizado y la posibilidad de consultarlos a distancia.

El primer ejemplo de memoria digital lo hallamos en las tarjetas perforadas de los telares inventados a principios del siglo XIX por el fabricante francés Joseph Marie Jacquard. Dichas tarjetas contaban con una serie de orificios (cuya presencia o ausencia equivalía a una lista de ceros y unos) que codificaban las instrucciones que automatizaban la confección de tejidos.

Algo después, en 1834, el matemático inglés Charles Babbage consideró la posibilidad de emplear tarjetas perforadas en su máquina calculadora. Tal innovación propiciaría más tarde la llegada de los ordenadores modernos y, con ellos,

EN SÍNTESIS

Los aparatos digitales utilizan dos tipos de memoria: las de acceso rápido, que intercambian datos con el procesador, y las de almacenamiento masivo, más lentas.

En la actualidad no existen memorias universales, rápidas y con capacidad para almacenar un gran volumen de datos. Tampoco se espera que lleguen en un futuro cercano.

A partir de efectos físicos muy diferentes, los investigadores trabajan en el desarrollo de nuevos dispositivos más veloces, fiables y que consuman menos energía.



Luca Perniola dirige el grupo de técnicas de memoria avanzadas del Laboratorio Electrónico y de Tecnología de la Información (LETI) del Comisariado de la Energía Atómica y Energías Alternativas de Grenoble.

el desarrollo de los soportes de memoria digitales. Durante los últimos veinte años, sus mejoras han estimulado la producción masiva de datos. Guardarlos resultaba cada vez más sencillo y menos costoso, por lo que hasta ahora no ha sido necesario limitar el volumen de datos que deseamos almacenar.

¿MEMORIAS UNIVERSALES?

Pero ¿podrán las memorias actuales asumir el ritmo al que crece la producción de datos? Varios indicios sugieren que no. Los ingenieros sueñan desde hace tiempo con las memorias «universales»: dispositivos de acceso muy rápido y capaces de guardar enormes cantidades de datos con fiabilidad y bajo consumo energético. Hoy por hoy, sin embargo, tales sistemas se antojan más hipotéticos que reales.

En lugar de basarse en un solo tipo de memoria, los sistemas digitales modernos conjugan dos clases de dispositivos: memorias de trabajo, que guardan pequeñas cantidades de datos y ofrecen tiempos de acceso muy breves, y memorias de almacenamiento, que registran enormes volúmenes de información a costa de un tiempo de acceso mayor. Una combinación adecuada de ambos tipos de memoria permite construir sistemas que ejecutan operaciones con gran rapidez y que, al mismo tiempo, pueden almacenar ingentes cantidades de datos.

En lo que respecta a la fabricación de memorias universales, no parece que la naturaleza sepa hacerlo mucho mejor que nosotros. Existen numerosas semejanzas entre los sistemas de memoria biológicos y los artificiales. Diversos modelos teóricos sobre el funcionamiento del cerebro suponen que la memoria humana dependería también de varios subsistemas especializados. Según un modelo clásico de los años sesenta, la memoria sensorial se encarga de retener durante un breve instante la información procedente de los sentidos, aunque sin interpretarla. Parte de ella se transmite después a la memoria a corto plazo, de capacidad limitada, donde queda disponible durante varias decenas de segundos (entre otras actividades, dicha memoria nos permite recordar el principio de una frase a medida que vamos leyendo). Por último, la memoria a largo plazo conserva cantidades considerables de información durante períodos muy prolongados.

Dicha estructura sería fruto de la evolución, ya que un tratamiento rápido de la información sensorial permite hacer frente a depredadores y otros peligros. Aunque desde los años sesenta este modelo se haya visto enriquecido con la adición de varias subcategorías, la conclusión principal sigue siendo la misma: no solo el cerebro humano no opera como una memoria universal, sino que la combinación de varios tipos de memoria especializados parece constituir una ventaja.

De igual modo, el diseño de dispositivos artificiales también se basa en asociar memorias de diferentes clases. Si bien en varias ocasiones se han presentado hipotéticos mecanismos universales, los estudios posteriores han acabado echando por tierra tales aspiraciones.

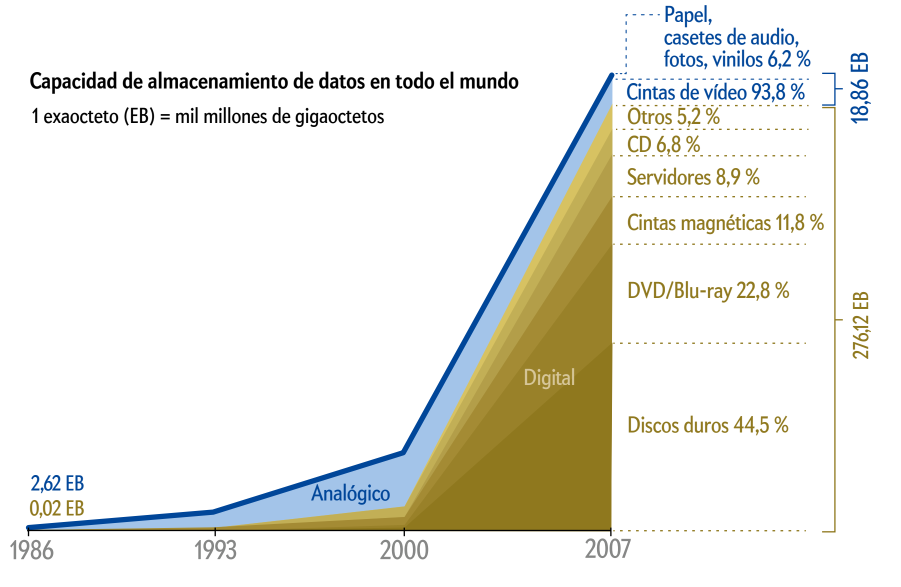
Hoy los fabricantes se concentran en mejorar las características de los modelos ya existentes, como su vida útil o su fiabilidad. Una de las cualidades más relevantes la hallamos en el tiempo de acceso; esto es, el tiempo que un dispositivo necesita para leer y escribir los datos. Según el tipo de sistema del que se trate, los tiempos de acceso actuales van del nanosegundo al milisegundo.

El procesador de una computadora necesita disponer con suma rapidez de las instrucciones y datos pertinentes para ejecutar una tarea. Por tanto, debe poder acceder a memorias de trabajo que ofrezcan un tiempo de acceso muy breve. No obstante, tales memorias resultan caras y no pueden guardar grandes cantidades de información, por lo que deben apoyarse en memorias de almacenamiento. Ambos sistemas resultan complementarios y coexisten en todos los aparatos digitales, ya se trate de ordenadores, tabletas, teléfonos móviles o lápices de memoria.

JERARQUÍA PIRAMIDAL

Las diferentes memorias digitales permiten definir una jerarquía piramidal. En la cima se sitúan las memorias de trabajo, con tiempos de acceso muy breves y escasa capacidad para registrar datos; al descender, aumenta el volumen de información que puede guardarse en detrimento del tiempo de acceso. Los dispositivos de almacenamiento ocupan la base de la pirámide.

Las memorias de trabajo y las de almacenamiento se diferencian en su capacidad para conservar la información en ausencia de un suministro estable de energía eléctrica. Las primeras reciben el



LA CAPACIDAD PARA ALMACENAR DATOS DIGITALES en todo el mundo ha experimentado un crecimiento espectacular durante los últimos lustros. El desarrollo de memorias baratas y fáciles de usar marcó un punto de inflexión a principios de este siglo. Los soportes digitales han ido ganando terreno a los analógicos, al tiempo que el volumen total de datos crece sin pausa; una tendencia sin visos de debilitarse.

FUENTE: «THE WORLD'S TECHNOLOGICAL CAPACITY TO STORE, COMMUNICATE AND COMPUTE INFORMATION», POR M. HILBERT Y P. LÓPEZ EN *SCIENCE*, VOL. 332, 2011/*POUR LA SCIENCE*

nombre de «volátiles», ya que, si se suprime la corriente, los datos desaparecen en pocas decenas de milisegundos. Las memorias de almacenamiento, en cambio, permiten guardar la información aun en ausencia de suministro eléctrico. Gracias a ello, podemos conservar los datos en el disco duro de un ordenador o en un lápiz de memoria USB.

Entre los dispositivos más próximos al procesador —en la cima de la pirámide— podemos distinguir memorias de trabajo de dos tipos: las memorias estáticas de acceso aleatorio (SRAM, por sus siglas en inglés) y las dinámicas (DRAM). Las primeras están construidas directamente sobre el chip de silicio del microprocesador, ya que, al igual que este, también se componen de transistores. Aunque gozan de tiempos de acceso de pocos nanosegundos, su capacidad de almacenamiento resulta muy escasa.

En el segundo nivel encontramos las memorias dinámicas de acceso aleatorio. Estas cuentan con una mayor capacidad para guardar datos, un tiempo de acceso comprendido entre 10 y 100 nanosegundos y, por lo general, se hallan en un microchip independiente. Suelen emplearse para las operaciones de cálculo de los microprocesadores.

En una memoria dinámica, cada bit queda registrado en un sistema compuesto por un transistor y un condensador, componentes que vienen grabados en el sustrato de silicio del chip de memoria. El transistor actúa como un interruptor que, en caso de estar abierto, autoriza que el bit sea leído por una corriente eléctrica. Desde un punto de vista físico, el bit se corresponde con la carga eléctrica del condensador: si este se encuentra cargado, el bit toma el valor 1; en caso contrario, vale 0.

El problema de los condensadores reside en su tendencia a descargarse, ya que los electrones se difunden con facilidad por el entorno de silicio. Ello hace que las memorias dinámicas sean volátiles, lo que obliga a reescribir cada bit a intervalos de tiempo regulares de pocas decenas de milisegundos. Como consecuencia, la supresión de la corriente eléctrica provoca la pérdida de los datos.

En las primeras memorias dinámicas de los años sesenta, transistores y condensadores estaban pegados. La miniaturización redujo el tamaño de los componentes y llevó a cambiar su posición relativa. Hoy los condensadores se sitúan encima de los transistores; además, presentan una forma cilíndrica y muy alargada que reduce el consumo eléctrico. Con una longitud hasta 50 veces mayor que la de la base y una densidad de condensadores muy elevada, los diseñadores se enfrentan al problema de las fugas y al reto de fabricar cavidades cada vez más delgadas. Parece difícil seguir aumentando la capacidad de almacenamiento de estos dispositivos (4 gigaoctetos), que bien podrían haber llegado ya a su límite de la miniaturización. En la actualidad, los ingenieros se esfuerzan sobre todo en aumentar la densidad de información y en reducir su consumo energético mediante la supresión de la volatilidad.

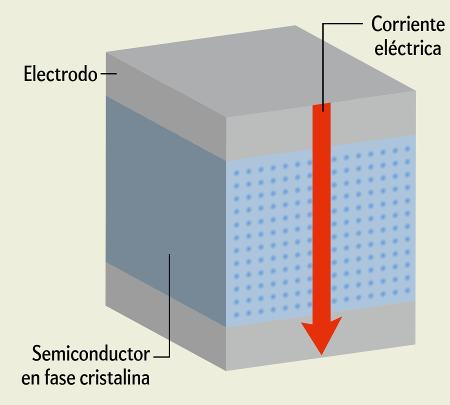
Más abajo en la pirámide encontraremos las memorias *flash*. Aunque son no volátiles, no pueden reemplazar a las dinámicas. Sus tiempos de acceso ascienden a una decena de microsegundos, dos órdenes de magnitud por encima del que ofrecen aquellas. Los valores de un bit almacenado en una memoria *flash* se corresponden con el estado, abierto o cerrado, de un transistor. Un pequeño

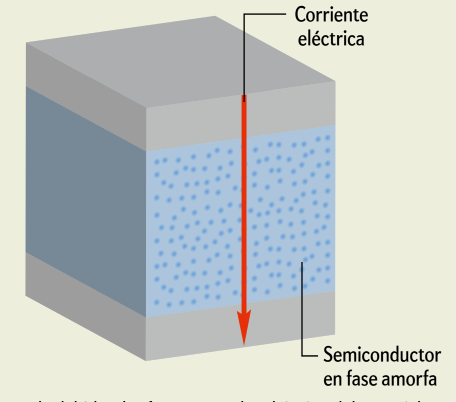
MEMORIAS DE TRABAJO

Las sucesoras de las memorias dinámicas

Las memorias dinámicas son volátiles; es decir, solo pueden guardar los datos mientras se les suministra una corriente eléctrica. Ello implica que los bits deben reescribirse durante el uso, con el consiguiente gasto energético. Esa pérdida de datos se debe a que los bits se guardan en condensadores, componentes electrónicos que presentan una tendencia natural a descargarse. Dos nuevos diseños, las memorias de cambio de fase y las memorias magnéticas, aspiran a corregir esa deficiencia mediante el reemplazo de condensadores por resistencias.

Memorias de cambio de fase





Las memorias de cambio de fase (PCRAM) constan de transistores (*no mostrados*) y resistencias. Estas últimas se componen de dos electrodos separados por un semiconductor, el cual puede adoptar una estructura cristalina o amorfa. En la primera fase (*izquierda*) los electrones pueden circular con facilidad, por lo que la resistencia es pequeña, en cuyo caso el bit correspondiente toma el valor 1. En la fase amorfa (*derecha*) la resistencia del material aumenta, lo que equivale a un bit en el estado 0.

Para cambiar el valor del bit, es preciso calentar el semiconductor. A tal fin se emplea una aleación resistiva que, por efecto Joule, eleva su temperatura al paso de una corriente eléctrica. Si la aplicación de calor es breve, se induce la disposición amorfa; en caso de que se prolongue, se recupera la estructura cristalina. Para que la transición sea reversible se necesitan temperaturas de entre 500 y 800 grados centígrados, lo que exige corrientes elevadas. La resistencia varía de manera considerable (en un factor de cien) al pasar de un estado a otro, lo que permite un tiempo de lectura bastante breve, ya que ambos estados se diferencian con claridad.

Esa amplitud en los valores de la resistencia podría aprovecharse para almacenar varios bits. En tal caso la escala no se dividiría en dos segmentos (correspondientes a los estados 0 y 1), sino en más, lo que permitiría codificar grupos de dos bits: 00, 01, 10 o 11. No obstante, dicho modo de operación resulta complicado debido a los fenómenos de relajación del material, el cual sufre choques térmicos durante las etapas de escritura y borrado. Entre una y otra sobreviene una relajación estructural que conduce a una variación de la resistencia, lo que impide un funcionamiento correcto.

Las memorias de cambio de fase presentan la ventaja de gozar de una gran estabilidad a temperaturas elevadas, por lo que resultarían adecuadas para aplicaciones en automóviles o en tarjetas de microchips, entre otras.

almacén en el seno de este componente electrónico permite acumular electrones; el campo eléctrico creado por estos permite o bloquea el paso de la corriente a través del dispositivo. La razón por la que estas memorias son no volátiles se debe a que los electrones permanecen bloqueados incluso en ausencia de una fuente externa, ya que la carga se almacena entre dos capas de óxidos que la aíslan del sustrato circundante.

Desde que se concibiesen en los años ochenta, las memorias *flash* también han experimentado un proceso paulatino de miniaturización. Su capacidad actual asciende a 128 gigaoctetos. Sin embargo, su carácter no volátil limita el grado de reducción al que pueden someterse las capas de óxidos, ya que una miniaturización excesiva debilitaría el bloqueo de los electrones. Además, al igual que ocurre con las memorias dinámicas, la miniaturización aumenta el riesgo de errores en el proceso de lectura y escritura. Hoy en día, a fin de aumentar la cantidad de información que puede registrarse en una placa de silicio, los fabricantes apilan varias capas de memoria unas sobre otras. De esta manera, la capacidad queda aproximadamente multiplicada por el número de capas.

Aun cuando parezca que la miniaturización de las memorias *flash* ha llegado a su límite, dichos dispositivos podrían reemplazar una parte de los discos duros. Desarrollados por IBM en la década de los cincuenta, estos soportes digitales registran la información en capas de material ferromagnético depositadas sobre discos giratorios. La cabeza de lectura, montada en un brazo mecánico, lee los datos a partir del estado magnético de cada bit, los cuales pueden reescribirse gracias al uso de efectos magnéticos reversibles.

Los discos duros ocupan la base de la pirámide de memorias. Su densidad de información supera a la de las memorias *flash*, con un precio menor por unidad almacenada. En cambio, su tiempo de acceso llega a varios milisegundos, ya que primero hay que posicionar correctamente la cabeza lectora mediante un desplazamiento del brazo mecánico y una rotación del disco.

Puede que, en los años venideros, algunos discos duros se vean reemplazados por ciertos dispositivos con memorias *flash* llamados SSD (por las siglas en inglés de «unidad de estado sólido», o *solid state drive*). Los ordenadores equipados con este tipo de memorias resultan mucho más rápidos; además, la ausencia de elementos mecánicos los hace más resistentes y menos propensos a los fallos.

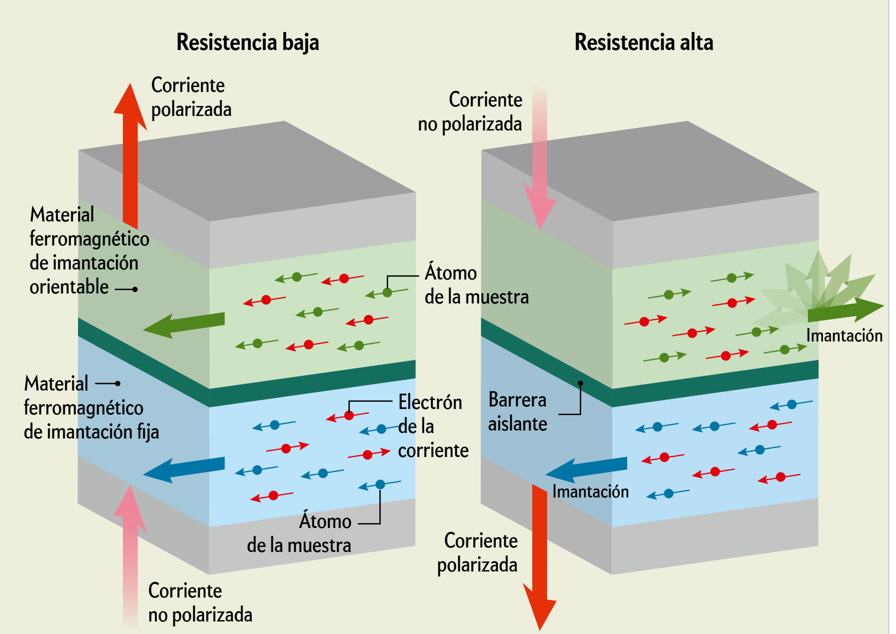
La popularización de las tabletas, los ordenadores portátiles y los teléfonos móviles ha espoleado el desarrollo de memorias resistentes a los choques. En cualquier caso, no se prevé que los discos duros vayan a desaparecer en un futuro próximo, ya que su coste resulta diez veces menor que el de las memorias *flash*.

NUEVOS DISPOSITIVOS

El hecho de que tanto las memorias dinámicas como las de tipo *flash* y los discos duros parezcan estar llegando a sus límites físicos ha incentivado el desarrollo de nuevos diseños. Con todo, las memorias que veamos aparecer dentro de unos años aún no podrán considerarse universales. Los expertos aún trabajan en dispositivos con características de memoria de trabajo o de almacenamiento, si bien intentan mejorar su capacidad, velocidad de lectura y escritura, y consumo energético.

Memorias magnéticas

Una de las opciones más atractivas para sustituir a las memorias dinámicas la hallamos en las memorias magnéticas (MRAM). En el caso de una memoria magnética por transferencia de espín, el bit también se almacena gracias a un transistor (*no mostrado*) y una resistencia. Esta última consta de una superposición de dos películas finas de material ferromagnético separadas por una barrera aislante, la cual los electrones solo pueden atravesar por efecto túnel. La información del bit queda grabada en la magnitud de la resistencia: 0 si es elevada, 1 si es baja.



El valor de la resistencia se controla mediante la imantación de las dos capas ferromagnéticas. Mientras que la imantación de una de las capas (*celeste*) se encuentra fija, la de la otra (*verde pastel*) puede orientarse a voluntad gracias al paso de una corriente de espín polarizado (es decir, una en la que los espines de todos los electrones apuntan en el mismo sentido).

El esquema de la izquierda ilustra el proceso de escritura que supone pasar del estado 0 al 1. Un flujo de electrones no polarizado (*rosa*) llega desde la parte inferior. La barrera de potencial facilita la transferencia de los electrones con espín orientado hacia la izquierda, lo que polariza el flujo de electrones en el material ferromagnético. El espín de los electrones interacciona con el de los átomos de la capa superior (*verde*) y los orienta hacia la izquierda. De esta manera, las imantaciones de las dos capas ferromagnéticas apuntan en el mismo sentido y la resistencia se reduce. Para medirla, puede inyectarse una corriente menos intensa, la cual revelará que el bit se encuentra en el estado 1.

Para devolver el bit al estado 0, se invierte el sentido de la corriente de polarización (*derecha*). El espín de los electrones que llegan desde la parte superior no posee una orientación definida. Sin embargo, los únicos que atraviesan la barrera son aquellos cuyo espín apunta hacia la izquierda. En el medio ferromagnético superior solo permanecen los electrones de espín opuesto, lo que provoca que la imantación bascule hacia la derecha. Las imantaciones resultantes son antiparalelas, lo que incrementa la resistencia y sitúa el bit en el estado 0.

Ese último aspecto ha acaparado de manera especial las investigaciones recientes. Las memorias no volátiles, al no requerir un suministro continuo de electricidad, presentan en este sentido claras ventajas. Sin embargo, aunque cabe esperar que su presencia en el mercado aumente, resulta difícil imaginar un sistema compuesto únicamente por memorias no volátiles. La más cercana al microprocesador debe poder consultarse en todo momento y su acceso debe ser ultrarrápido. A tal fin, las memorias estáticas SRAM siguen constituyendo la opción más eficaz y que menos energía consume, por lo que no cabe esperar que acaben siendo sustituidas por dispositivos no volátiles. (En sentido estricto, cabe distinguir tres tipos de memorias estáticas; hoy en día se investiga cómo reemplazar uno de ellos por otros sistemas con mejores prestaciones.)

Por otro lado, sí se prevé la llegada de nuevos dispositivos que sustituyan a las actuales memorias dinámicas y que desempeñen una función intermedia entre estas últimas y las de tipo *flash*. En los modelos que presentaremos a continuación, el condensador de las memorias dinámicas se sustituye por una resistencia variable. De esta manera, el estado 0 o 1 de cada bit corresponde a un valor bajo o elevado de la resistencia. Estos componentes electrónicos no presentan el problema de la fuga de cargas, por lo que dichas memorias no son volátiles. Existe una gran diversidad de memorias basadas en resistencias variables, clasificadas según el principio físico que genera la resistencia. Dos posibles sucesoras de las memorias dinámicas son las memorias magnéticas y las de cambio de fase. Consumen menos energía y, en principio, ofrecen una densidad de información equivalente a la de las memorias dinámicas.

Las memorias magnéticas (MRAM, por sus siglas en inglés) existen desde los años cincuenta. Hasta hace poco su uso se había limitado a ámbitos muy específicos, como el aeroespacial, dada su capacidad para resistir los errores de lectura inducidos por los rayos cósmicos. Durante los últimos diez años, sin embargo, las memorias magnéticas han sido objeto de varias innovaciones, lo que ha reavivado el interés por ellas.

La capacidad de las memorias magnéticas actuales asciende a 64 megaoctetos. La resistencia que codifica el bit se controla mediante la imantación de varios de los elementos que la componen. El tiempo de escritura ronda el nanosegundo, si bien el de lectura se demora algo más. Ello se debe a que los valores de la resistencia que caracterizan los estados 0 y 1 no difieren mucho entre sí (la magnitud de la resistencia varía en una proporción de uno a diez, aproximadamente), por lo que se requiere más tiempo para leer la información sin ambigüedades.

El segundo dispositivo que podría sustituir a las memorias dinámicas recibe el nombre de memoria de cambio de fase (PCRAM). Fue desarrollado a finales de los años sesenta por el inventor estadounidense Stanford Ovshinsky, un autodidacta que en 50 años registró más de 400 patentes, en su mayoría explotadas por la industria.

En este tipo de memorias la resistencia queda determinada por la estructura

MEMORIAS DE ALMACENAMIENTO

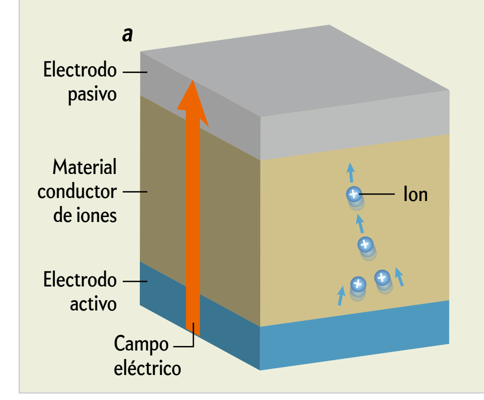
Memorias de óxidos y de puente conductor

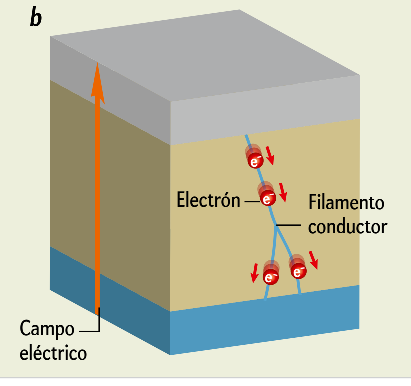
Las memorias *flash* podrían sustituirse por dispositivos basados en memorias de óxidos (OxRAM) y de puente conductor (CBRAM). En ellas, cada bit de información se guarda en un sistema formado por un transistor acoplado a una resistencia. Esta última se compone de dos electrodos separados por un óxido aislante o un sólido permeable a iones. El valor (1 o 0) del bit queda codificado en la magnitud de la resistencia (baja o alta). Dicha magnitud depende de la presencia o ausencia de un filamento conductor entre los electrodos, el cual puede crearse o destruirse mediante la aplicación de un estímulo eléctrico.

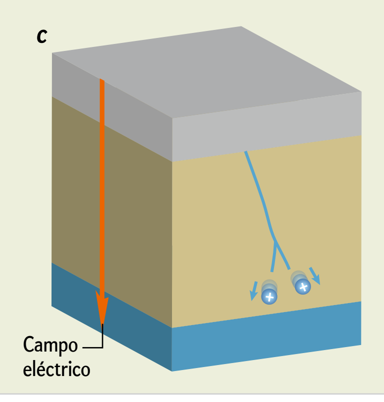
Aunque el fenómeno de la degradación eléctrica del óxido (responsable de la formación del filamento conductor) se viene estudiando desde los años sesenta, la industria no mostró interés por él hasta 2004. En general, el sustrato de las memorias de óxidos es «virgen» antes de su primer uso. Para iniciar la creación del filamento debe aplicarse una tensión considerable. Después, sin embargo, basta con aplicar voltajes mucho menores, puesto que solo se crea o se destruye una pequeña porción del filamento.

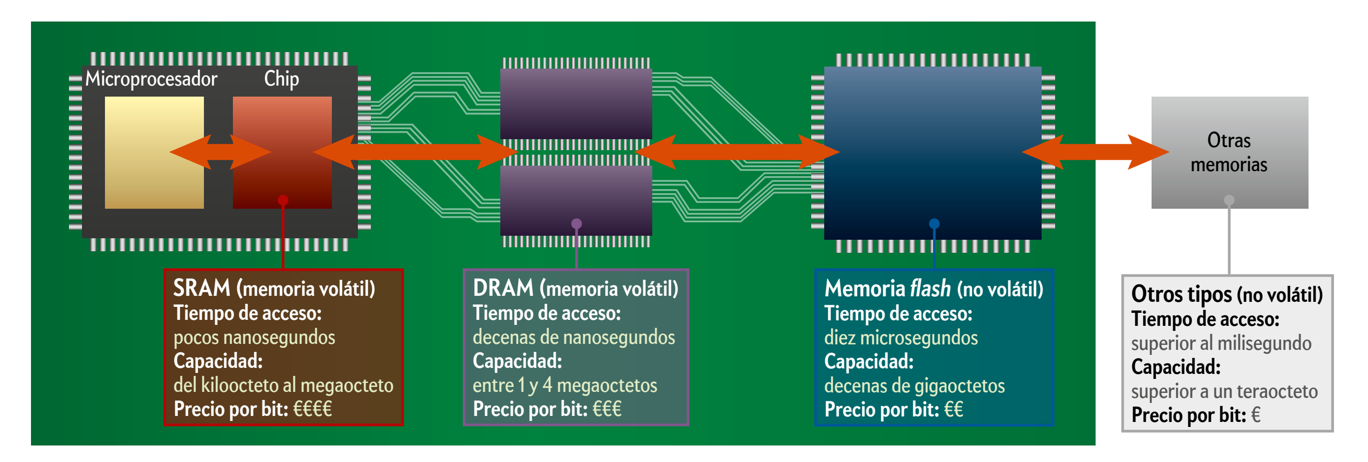
La física de las memorias de puente conductor se conoce mucho mejor. La naturaleza del puente depende de la composición del electrodo activo (cobre, plata...). El filamento se forma a partir de la disolución de dicho electrodo, que emite cationes que se propagan hacia el pasivo por acción de un campo eléctrico (*a*). Una vez reducidos, los cationes forman un filamento de átomos neutros que une los electrodos (*b*), la resistencia del dispositivo disminuye y el bit pasa del estado 0 al 1. El proceso puede revertirse si se aplica un campo eléctrico en sentido opuesto, lo que provocará que algunos cationes regresen al electrodo inicial (*c*).

Numerosas investigaciones persiguen mejorar estos dispositivos mediante el uso de nuevos materiales. Con todo, puede que se necesiten varios años para entender en profundidad los efectos microscópicos implicados.









TODO SISTEMA DIGITAL conjuga dos tipos de memoria: de trabajo y de almacenamiento. Las primeras, ya sean estáticas o dinámicas, se sitúan lo más cerca posible del microprocesador (el dispositivo encargado de ejecutar los cálculos). Pueden intercambiar información con gran rapidez, pero su capacidad para guardar datos es pequeña. Las memorias de almacenamiento (*flash* y discos duros, entre otras) pueden registrar grandes cantidades de datos, pero su tiempo de acceso resulta mayor.

microscópica del semiconductor, el cual puede adoptar una disposición cristalina o amorfa, lo que corresponde a un estado conductor o aislante. Dicha estructura puede modificarse de modo reversible mediante la aplicación de calor. Este procedimiento implica un mayor gasto energético para escribir o borrar un bit que en las memorias magnéticas.

Hoy las memorias de cambio de fase cuentan con una capacidad de un gigaocteto y un tiempo de escritura del orden de decenas de nanosegundos. A pesar de que estas prestaciones son inferiores a las de las memorias magnéticas, su tiempo de lectura resulta más breve, ya que la diferencia entre las magnitudes de la resistencia que caracterizan los dos estados es más acusada (con un factor superior a cien). Además, son robustas y funcionan bien a temperaturas elevadas.

Por último, el panorama de las memorias de almacenamiento podría cambiar en un plazo de entre cinco y diez años. Hoy por hoy los discos duros proporcionan las memorias más económicas, pero su fragilidad resulta excesiva para los cada vez más populares dispositivos portátiles (tabletas, teléfonos, ordenadores...). Pese a haber sido sustituidos de modo parcial por memorias *flash*, se vislumbran ya nuevos diseños que podrían reemplazar a estas últimas dentro de poco.

Entre las numerosas posibilidades que se han investigado hasta ahora destacan dos: las memorias de óxidos (OxRAM) y las de puente conductor (CBRAM). Aunque recientes, el interés que han generado está propiciando la aparición de una gran diversidad de prototipos. No parece imposible que acaben sustituyendo también a las memorias dinámicas. En 2013, las compañías Sandisk y Toshiba anunciaron una nueva memoria de óxidos de 32 gigaoctetos.

Al igual que las memorias magnéticas y las de cambio de fase, las memorias de óxidos guardan los datos en unidades formadas por un transistor y una resistencia variable. Su magnitud queda determinada por la presencia o ausencia de un filamento que conecta dos electrodos, el cual puede crearse o destruirse por acción de corrientes y campos eléctricos. En el caso de las memorias de puente conductor, el filamento se forma a partir de los iones de carga positiva extraídos de uno de los electrodos. Cuando la cadena une ambos extremos, la resistencia es baja y la corriente circula con facilidad, en cuyo caso el bit toma el valor 1. Cuando el campo eléctrico se invierte, los átomos vuelven a ionizarse y emigran hacia el electrodo. De esta manera la cadena se rompe, la resistencia aumenta y el bit pasa de 1 a 0. El proceso es reversible.

HORIZONTE INCIERTO

Los avances en este campo se suceden con tal rapidez que resulta muy difícil caracterizar con precisión las nuevas memorias. Su tiempo de escritura oscila entre el nanosegundo y el milisegundo. En general, gozan de técnicas de fabricación bastante sencillas —sobre todo en lo que respecta a las memorias de óxidos— y de un coste muy competitivo. Como contrapartida, aún falta por entender mejor los fenómenos microscópicos involucrados.

No todos los dispositivos que hemos presentado aquí han alcanzado el mismo grado de madurez, por lo que su salida al mercado aún puede demorarse. Si los discos duros comenzasen a desaparecer ya de los aparatos móviles, sus memorias dinámicas no podrían reemplazarse antes de unos tres o cinco años.

La demanda de memorias cada vez más eficientes continuará en aumento. Ello animará a universidades, centros de investigación y constructores a explorar toda una diversidad de posibilidades. Ante una competencia tan feroz e inventiva, la evolución puede ser rápida, lo que hace muy difícil prever qué componentes dominarán el mercado dentro de cinco, diez o veinte años. Se observa una tendencia a abandonar la idea de una técnica universal capaz de reemplazar a todas las memorias actuales. Parece que, en su lugar, veremos una coexistencia de varios sistemas con prestaciones mucho mejores que las que disfrutamos hoy. ¿Hasta dónde? No lo sabemos.

PARA SABER MÁS

Phase-change memory technology. G. W. Burr et al. en *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol. 28, n.º 2, págs. 223-262, 2010.
The world's technological capacity to store, communicate and compute information. M. Hilbert y P. López en *Science*, vol. 332, págs. 60-65, 2011.
Metal oxide RRAM. H. S. Wong et al. en *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, n.º 6, págs. 1951-1979, 2012.
Spin-transfer torque RAM technology: Review and prospects. T. Kawahara et al. en *Microelectronics Reliability*, vol. 52, págs. 613-627, 2012.

MEDICINA

EL LARGO CAMINO HACIA LA COMPRENSIÓN DEL CÁNCER

La biología de esta enfermedad está resultando ser más compleja de lo que se pensaba

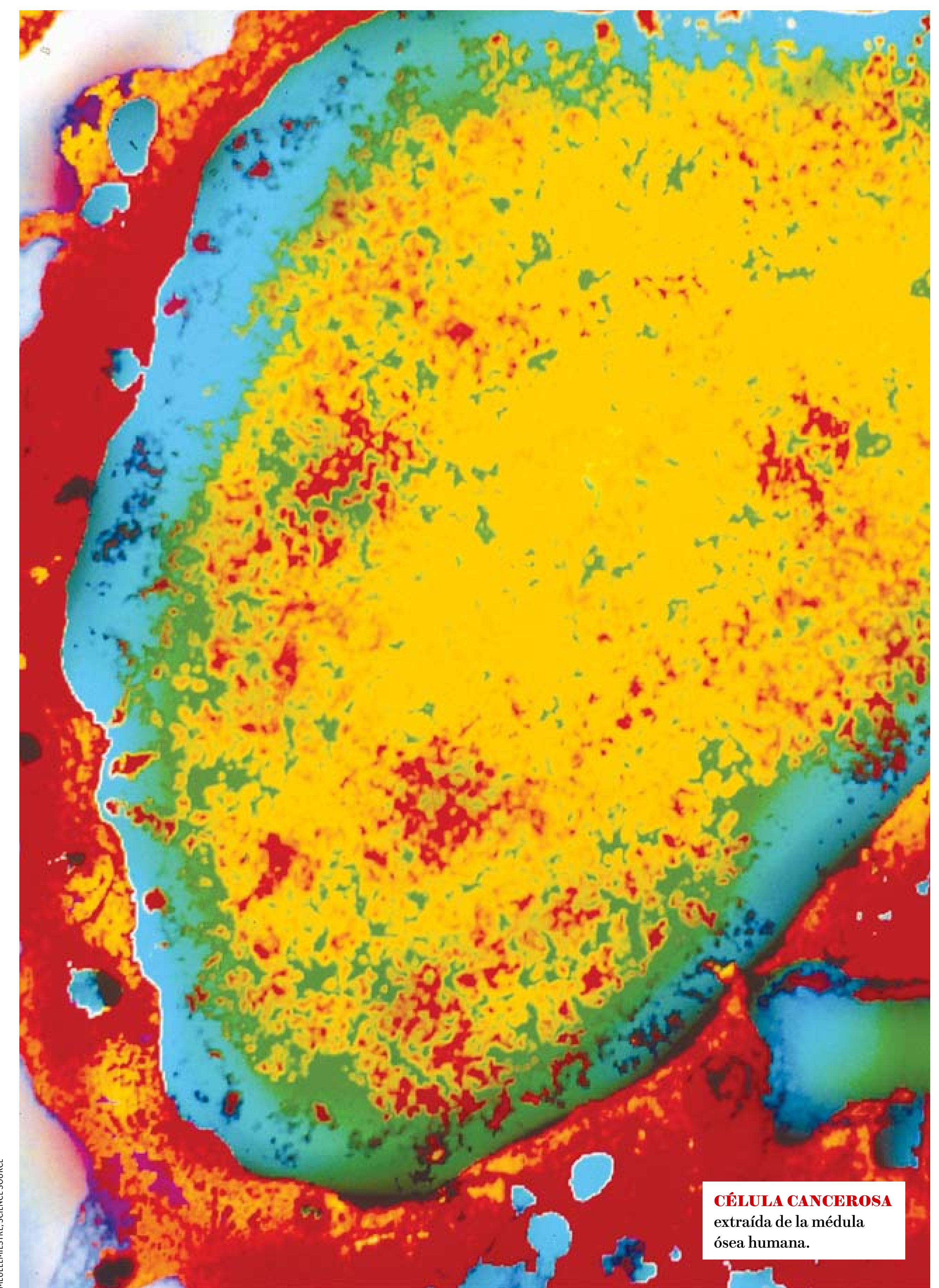
George Johnson

LAS COSAS POCAS VECES SON TAN SENCILLAS COMO PARECEN Y LO QUE SE SUPONE COMPLEJO PUEDE no ser más que una ligera perturbación superficial en un océano insondable. La formación de los tumores malignos, en que una célula adquiere una mutación tras otra hasta que se precipita por el abismo del cáncer, fue elegantemente descrita por dos científicos, Douglas Hanahan y Robert A. Weinberg, en una extensa revisión publicada en 2000 bajo el título *The hallmarks of cancer* («Las características distintivas del cáncer»).

La idea de que el cáncer se origina por una acumulación de mutaciones en una célula normal se remonta varias décadas. Pero fueron Hanahan y Weinberg quienes, a partir de la cantidad creciente de datos experimentales y teóricos, sintetizaron las seis características que una célula debe adquirir para convertirse en cancerosa. Tiene que desarrollar la capacidad de estimular su propio crecimiento y de ignorar las señales que le aconsejan que lo ralentice (aquí es donde entran en juego los oncogenes y los genes supresores de tumores). Debe aprender a eludir los mecanismos de seguridad, que hacen que incluso las células ligeramente anómalas se autodestruyan, y a desestimar las medidas internas (los telómeros que se hallan en los extremos de los cromosomas) que limitan el número de veces que se divide una célula. Debe aprender a iniciar la angiogénesis (la generación de sus propios vasos sanguíneos) y, por último, a alimentarse del tejido circundante y a metastatizar.

Más de una década después de su publicación, el artículo de Hanahan y Weinberg seguía siendo el más citado en la historia de la prestigiosa revista *Cell*, es decir, tal vez se trate del artículo más influyente en la biología del cáncer. Conocida como la teoría monoclonal (se denomina clon al conjunto de una célula que se divide y sus sucesivos descendientes), la idea descrita en el artículo constituye todavía el paradigma dominante, igual que ocurre con la teoría de la gran explosión en cosmología. La creación comenzó como una singularidad, un punto de masa-energía primordial, que estalló y dio lugar al universo. Un cáncer comienza con una «célula renegada» (término popularizado por Weinberg) que prolifera para formar un tumor. Partiendo de este planteamiento básico, los dos científicos ansiaban un renacimiento en la comprensión del cáncer:

«Con un conocimiento holístico del mecanismo, el pronóstico y tratamiento del cáncer se convertirán en una ciencia racional, irreconocible para los facultativos de hoy en día... Podemos imaginar fármacos dirigidos contra cada una de las propiedades distintivas del cáncer... Algún día, la biología y el tratamiento del cáncer —en la actualidad una mezcla de biología celular, genética, histopatología, bioquímica, inmunología y farmacología— se convertirán en una ciencia con una estructura conceptual y una coherencia lógica equiparables a las de la química o la física.»



MEULLEMIESTRE, SCIENCE SOURCE

CÉLULA CANCEROSA extraída de la médula ósea humana.

¡Una «física» del cáncer! Todavía podría suceder, pero más de un decenio después de haber realizado esa poco modesta predicción, los expertos siguen descubriendo niveles de complejidad totalmente nuevos.

George Johnson escribe sobre ciencia en el *New York Times*. También ha escrito para las revistas *National Geographic, Slate, Discover, Wired* y *Atlantic*.



MÁS ALLÁ DE LAS MUTACIONES

En el interior del microchip biológico que denominamos «célula» hay componentes que forman parte de otros, así como unas conexiones tan densas y cambiantes que, a veces, parece imposible desenredar la madeja. Si nos situamos en un plano superior, no podemos entender del todo lo que ocurre en una célula cancerosa sin tener en cuenta su posición en la compleja red de comunicaciones que establece con otras células. En el momento en que Hanahan y Weinberg publicaron su artículo, ya se empezaba a saber que los tumores no estaban constituidos por masas homogéneas de células malignas, sino que también contenían células sanas que ayudaban a producir las proteínas que necesita un tumor para extenderse y atacar los tejidos y para conectarse al torrente sanguíneo. Este ecosistema aberrante se ha denominado microentorno celular del cáncer y se han dedicado congresos y revistas científicas enteras para llegar a comprenderlo.

A esa complejidad se ha añadido la constatación gradual de que los cambios genéticos que pueden originar un tumor no se producen necesariamente mediante mutaciones (las deleciones, adiciones o reordenamientos de la secuencia de nucleótidos del ADN celular). El mensaje puede modificarse de formas mucho más sutiles.

Una consiste en la incorporación de marcadores moleculares a un gen, de modo que este queda inutilizado y deja de producir su mensaje genético. La expresión de los genes también puede intensificarse o suprimirse al torcerse la forma del genoma. En la imagen icónica del ADN, las dos hebras entrelazadas flotan elegantemente, como si se tratase de una medusa solitaria y aislada. Pero, dentro del desorden que existe en el interior de la célula, las dos hebras helicoidales se enrollan en torno a unas agrupaciones de proteínas denominadas histonas. Los grupos metilo y otras moléculas se unen a la hélice o a su núcleo proteico y hacen que el conjunto se encorve. Cuando eso ocurre, algunos genes quedan expuestos y otros quedan ocultos.

Estas alteraciones, que cambian la función de una célula pero que mantienen su ADN intacto, se denominan epigenéticas. En griego antiguo, la palabra *epi* puede significar «sobre», «arriba» o «encima». Además de un genoma, las células poseen un epigenoma. Por así decirlo, correspondería a una capa de *software* que recubriría el *hardware* del ADN. Igual que el genoma, el epigenoma se conserva y se transmite a las células hijas.

Todas esas investigaciones hacen pensar que el cáncer quizá no solo se deba a anomalías en los genes. Las alteraciones en una célula (a causa de carcinógenos, la dieta o, incluso, el estrés) podrían reorganizar los marcadores epigenéticos sin mutar directamente el ADN. Supongamos que un grupo metilo evita normalmente la expresión de un oncogén (un gen que estimula la división celular). Si se elimina el marcador, la célula podría empezar a dividirse de forma descontrolada. Por otro lado, la existencia de demasiados marcadores podría desactivar un gen supresor de tumores que, en condiciones normales, mantendría la mitosis bajo control. Con total libertad para proliferar, la célula se volvería más vulnerable a los errores de copia. De este modo, los cambios epigenéticos darían lugar a cambios genéticos; y estos, a su vez, podrían afectar a la metilación, lo que desencadenaría más modificaciones epigenéticas, y así sucesivamente.

Fuera del laboratorio, el entusiasmo hacia tal idea está impulsado por la esperanza y el temor. La epigenética podría dotar a una sustancia de un mecanismo para actuar como un carcinógeno, a pesar de haberse demostrado su incapacidad de destruir el ADN. Pero, a diferencia del daño genético, estos cambios resultarían reversibles. No está clara la importancia del papel que desempeña la epigenética. Como todo lo que sucede en el interior de una célula, la metilación y la modificación de las histonas están controladas también por genes, y se ha visto que estos también sufren mutaciones en distintos tipos de cáncer. Puede que, al final, todo se reduzca a las mutaciones.

Por otro lado, algunos científicos han propuesto que de hecho el cáncer comienza con las alteraciones epigenéticas, las cuales sientan las bases para la aparición de cambios más devastadores.

Todavía más inquietante resulta una idea polémica denominada teoría de las células madre cancerosas [*véase* «Células madre, ¿culpables del cáncer?», por Michael F. Clarke y Michael W. Becker; Investigación y Ciencia, septiembre de 2006]. En un embrión en desarrollo, las células madre poseen capacidad de autorrenovarse de manera indefinida, al dividirse una y otra vez y mantenerse en un estado indiferenciado. Cuando se necesita formar un determinado tipo de tejido, se activan los genes según un patrón específico y tales células dan lugar a otras especializadas, con una identidad concreta.

Una vez el embrión se ha transformado en un nuevo ser, las células madre adultas desempeñan un papel similar. Se hallan preparadas para diferenciarse y reemplazar las células que han resultado dañadas o que han alcanzado el final de su vida útil. Dado que los tejidos sanos surgen a partir de un pequeño conjunto de estos poderosos antecesores, ¿no podría ocurrir lo mismo con los tumores?

Ello daría un giro inesperado a la idea tradicional de que cualquier célula cancerosa que haya adquirido la combinación de mutaciones adecuada tendría la capacidad de generar un tumor. Imaginemos que, en vez de ello, el crecimiento y propa-

EN SÍNTESIS

¿Qué impulsa a ciertas células a convertirse en cancerosas y crecer para formar tumores? Según se pensaba, la respuesta se hallaría únicamente en el modo en que algunos genes decisivos sufrían daños o mutaciones con el tiempo.

Pero en la última década se han desvelado muchos otros factores que contribuyen al cáncer, desde las bacterias que habitan en el intestino hasta los interruptores epigenéticos que activan o desactivan diversos genes.

Desentrañar esta creciente complejidad hace que la comprensión del cáncer resulte más difícil que nunca, pero también ofrece la posibilidad de explorar vías inesperadas para el desarrollo de nuevos tratamientos.

gación de un cáncer está dirigido por una fracción de células especializadas, aquellas que, de algún modo, han llegado a adquirir una cualidad intrínseca que podríamos denominar troncalidad (*stemness*). Solo las células madre cancerosas tendrían la posibilidad de replicarse indefinidamente, metastatizar y servir de germen para otros procesos malignos. Tal situación pondría las cosas mucho más fáciles a los oncólogos. Tal vez la quimioterapia falle porque no actúa sobre las células madre cancerosas. Eliminemos esas piezas y el proceso maligno se desmoronará.

Los cambios genéticos que pueden dar lugar al cáncer no solo corresponden a mutaciones, sino también a alteraciones leves

Mientras me afanaba por asimilar toda esta información, me sentí muy aliviado al hallar investigadores que parecían sentirse tan desconcertados como yo. Con independencia de las consecuencias de la nueva visión, la consideración subyacente del cáncer como un proceso darwinista (que surge como la vida misma, mediante variaciones aleatorias y selección) permanecerá imperturbable. Pero, siendo un profano que trata de comprender los aspectos básicos del cáncer, me sentí intimidado ante la posibilidad de que se añadiese alguna vuelta de tuerca.

Al final, la biología se reduce a genes que se comunican con otros (dentro de la célula o de una célula a otra), en una constante cháchara molecular. Sin embargo, no había considerado que los genes de los tejidos humanos pudieran también intercambiar información con los de los microorganismos que residen en nuestro organismo. El cáncer es una enfermedad de la información, de señalizaciones celulares desorganizadas. Se nos presenta, por tanto, un nuevo campo para explorar.

ENTURBIANDO LAS AGUAS

Los avances en nuestro conocimiento sobre la biología de las células normales han puesto al descubierto una nueva complicación. Con todo su poder para crear y dirigir la vida, los genes están formados por combinaciones de tan solo cuatro nucleótidos, representados mediante las letras G, C, A y T. Cada uno de ellos posee un contorno único y estos patrones de surcos y protuberancias son copiados a partir del ADN en moléculas de ARN mensajero; estas, a su vez, son transportadas a los ribosomas, las estructuras celulares que utilizan la información para fabricar proteínas. Entre ellas se incluyen las enzimas, que ayudan a hacer funcionar la maquinaria genética. La simplificación suprema de la teoría fue lo que Francis Crick denominó el «dogma central»: de ADN a ARN a proteína.

Pronto se observó que el mecanismo resultaba más complejo. No todos los fragmentos del ADN formaban parte del código proteico. Algunas secuencias se utilizaban para fabricar el ARN mensajero y el ARN de transferencia. Otras servían para activar o reprimir la expresión de un gen y modular así la producción de su proteína. A la vista de toda esta maquinaria y de sus complejos engranajes, casi cabría imaginar que se trataba de la obra de un ingeniero. Pero la naturaleza era mucho más enrevesada. Los genes, por ejemplo, no eran continuos. Se hallaban interrumpidos por fragmentos sin ningún sentido. A medida que el mensaje genético se imprimía en el ARN mensajero, tales fragmentos, denominados intrones, se debían eliminar. Correspondían a accidentes de la evolución y la entropía. De hecho, parecía que solo un pequeño porcentaje del genoma poseía una finalidad. El resto acabó siendo denominado ADN basura, un revoltijo de genes deteriorados y descartados a lo largo de millones de años. Al no haber una razón imperiosa para deshacerse de estos residuos, se han ido llevando a cuestas, generación tras generación.

A duras penas se podía concebir que una parte tan importante del genoma se mantuviese inerte y en silencio. Seguro que, con sus constantes ajustes, la evolución acabaría encontrando nuevos usos para algunos de los elementos descartados. A principios de la década de los noventa, se comenzó a advertir la existencia un nuevo tipo de ARN producido por el ADN basura. Cuando se acoplaba a un ARN mensajero, impedía que este entregase su información. Debido a su pequeño tamaño se denominó microARN. Había distintas variantes y, a medida que su número aumentaba o disminuía, regulaba la producción de diversas proteínas. Como casi todo en la célula, estaba destinado a desempeñar un papel en el cáncer. Supongamos que un microARN se encarga de bloquear la expresión de un oncogén que promueve la proliferación. Si la célula produjese una cantidad demasiado pequeña de este regulador, ello estimularía la multiplicación. O bien, una cantidad excesiva de otro tipo de microARN podría desactivar un gen supresor de tumores. De hecho, puede que una sola de estas moléculas regule varios genes diferentes, lo que daría lugar a un conjunto de efectos entremezclados. Se creía que las mutaciones en el ADN basura resultaban inocuas. Pero si alteran el equilibrio que hay entre los microARN, podrían convertir una célula en cancerosa.

Basura que no lo es y genes (el 99 por ciento de ellos) que residen en nuestros microorganismos y no en nuestras propias células. El decorado del fondo parecía estar cambiando su sitio con el primer plano, lo que me hizo recordar lo que ocurrió en cosmología cuando la mayor parte del universo resultó estar formada por materia oscura y energía oscura. Pero, a pesar de todas las nuevas concepciones, la propia teoría de la gran explosión se mantuvo en pie. No era tan sencilla y nítida como antes, pero aportaba, a grandes rasgos, un marco en el que todo, aberraciones incluidas, tenía sentido.

Lo mismo parece estar sucediendo con las seis propiedades del cáncer descritas por Hanahan y Weinberg. En marzo de 2011, ambos escribieron el artículo *Hallmarks of cancer: the next generation* («Las características distintivas del cáncer: la nueva generación»). Al mirar hacia atrás, una década después de la publicación de su artículo inicial, llegaban a la conclusión de que el paradigma era más fuerte que nunca. Sin duda habían surgido complicaciones. Las células madre y la epigenética tal vez desempeñen un papel más relevante. Al final, puede que haya más de seis características distintivas. Nos queda la esperanza de que ese número sea finito y razonablemente pequeño.

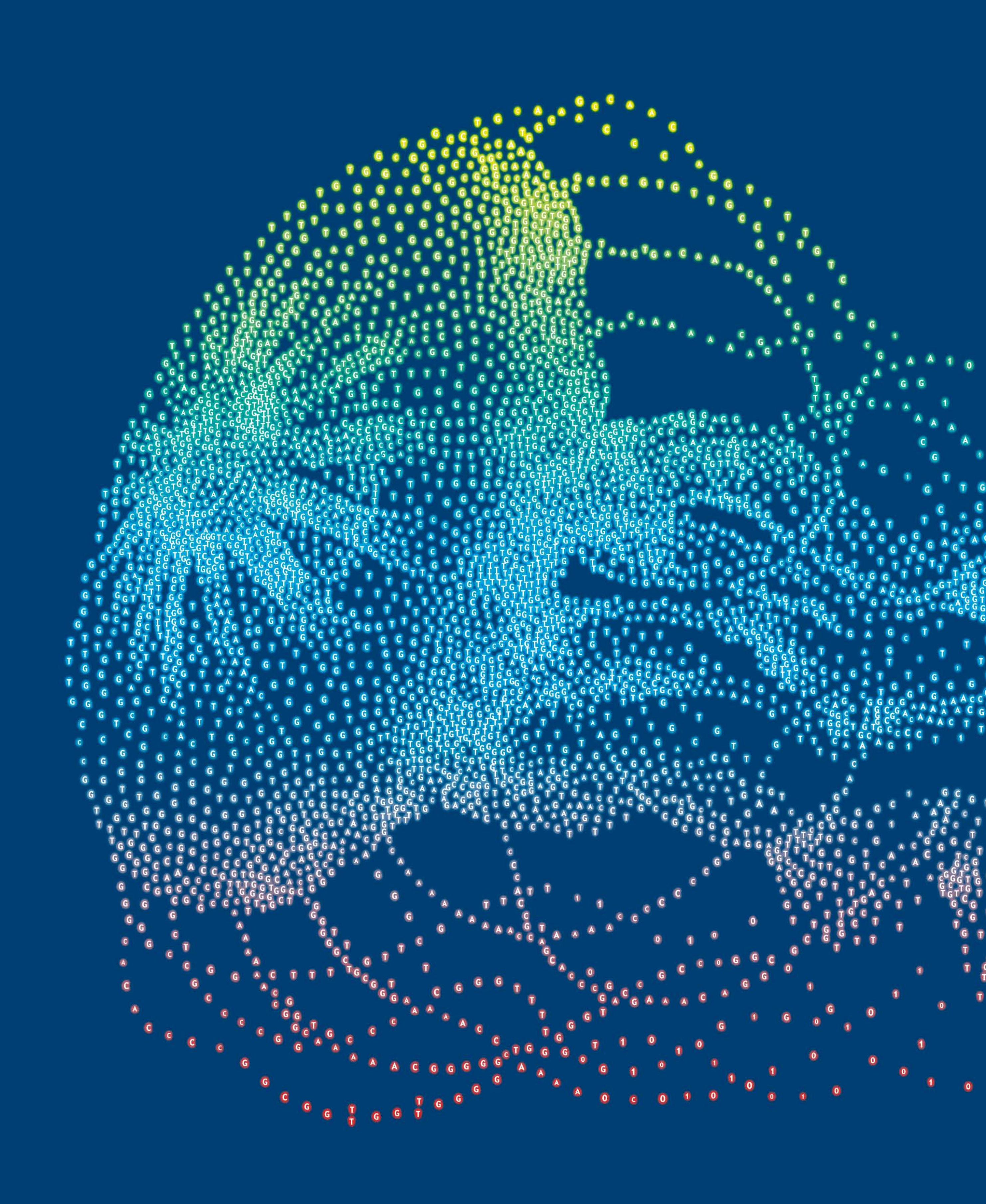
PARA SABER MÁS

Hallmarks of cancer: The next generation. Douglas Hanahan y Robert A. Weinberg en *Cell*, vol. 144, n.º 5, págs. 646-674, marzo de 2011. **www.cell.com/fulltext/S0092-8674(11)00127-9**

A decade of exploring the cancer epigenome-biological and translational implications. Stephen B. Baylin y Peter A. Jones en *Nature Reviews Cancer*, vol. 11, págs. 726-734, octubre de 2011. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21941284**

EN NUESTRO ARCHIVO

El genoma del cáncer. Francis S. Collins y Anna D. Barker en *IyC*, mayo de 2007.



COMPLEJIDAD

Metabiología: los orígenes de la creatividad biológica

Un modelo matemático sencillo en el que resulta posible demostrar los principios que rigen la teoría darwinista de la evolución

Gregory Chaitin, Virginia Chaitin y Felipe S. Abrahão

Gregory Chaitin es matemático y teórico de la computación de la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Ha destacado por sus contribuciones pioneras a la teoría algorítmica de la información y es el creador del programa de investigación en metabiología.

Virginia M. F. G. Chaitin es especialista en epistemología interdisciplinar. Trabaja en la UFRJ, donde investiga aspectos filosóficos de la metabiología.

Felipe S. Abrahão es estudiante de doctorado de la UFRJ. Trabaja en el campo de la lógica matemática y en metabiología.



Las matemáticas desempeñan un papel clave en física, pero no en biología.

Si podemos entender el comportamiento de las partículas subatómicas, el origen y la evolución del universo o la complejidad de la mecánica de fluidos, es gracias a la aplicación de principios y herramientas matemáticas. En biología, en cambio, no sucede lo mismo. Aunque es cierto que las matemáticas están ayudando a describir ciertos fenómenos (sobre todo aquellos relacionados con los sistemas complejos, como las interacciones en redes ecológicas o la propagación de enfermedades, entre otros), estas no se encuentran entre los fundamentos de las principales teorías biológicas.

A continuación presentaremos una línea de investigación incipiente, iniciada hace unos cinco años, que persigue abordar desde un punto de vista matemático uno de los pilares de la biología: la teoría de la evolución de Darwin. ¿Pueden las matemáticas explicar la enorme plasticidad de la biosfera?

Nuestra propuesta se basa en la idea de considerar el ADN como un programa informático, una analogía concebida en 1948 por el matemático John von Neumann y publicada en 1951, antes de que James Watson y Francis Crick descubriesen la estructura de la molécula de ADN. En particular, nuestro modelo persigue entender la creatividad biológica: fenómenos como la formidable aparición de nuevas formas de vida que tuvo lugar durante la explosión cámbrica, analizada por Stephen Meyer en su reciente y provocativo libro *Darwin's doubt* («La duda de Darwin»).

La idea principal puede resumirse como sigue. Todos hemos oído alguna vez que el código genético es el programa informático de la vida. Craig Venter defiende con contundencia este punto de vista en su último libro, *Life at the speed of light: From the double helix to the dawn of digital life* («La vida a la velocidad de la luz: De la doble hélice a los albores de la vida digital»), en el que también aborda la biología digital y la vida sintética. Así pues, en lugar de estudiar mutaciones aleatorias de ADN, consideraremos mutaciones aleatorias de programas informáticos.

La teoría de la evolución de Darwin ha sido calificada a menudo como «diseño sin diseñador». Aquí exploraremos la noción de «programación sin programador». Como veremos, este marco permite formular un modelo evolutivo lo bastante simple como para demostrar que los principios que rigen la teoría de Darwin funcionan; es decir, que las mutaciones aleatorias generan organismos cada vez más aptos, en un proceso que no conoce fin.

Cabe esperar que nuestro modelo reproduzca las propiedades matemáticas de algunos de los mecanismos fundamentales de la evolución biológica. En particular, veremos que nos permite analizar de dónde proceden los nuevos genes, algo imposible de hacer con otros modelos de la evolución. La genética de poblaciones, por ejemplo, se limita a estudiar los cambios en la frecuencia con que aparecen los genes ya existentes, pero no nos dice nada sobre su origen.

Tal vez nuestra idea recuerde a la línea de investigación llamada programación genética [*véase* «Invención por evolución», por J. R. Koza, M. A. Keane y M. J. Streeter; Investigación y Ciencia, abril de 2003]. Sin embargo, el objetivo de esta última consiste en generar programas informáticos que converjan hacia soluciones prácticas de problemas de ingeniería, no en demostrar que la evolución es eterna.

PROGRAMACIÓN SIN PROGRAMADOR

Comencemos por recordar los principios de la teoría darwinista de la evolución, el «diseño sin diseñador». Según esta, las mutaciones aleatorias de ADN generan nuevos organismos; después, la selección natural se encarga de filtrar los más aptos. La creatividad procede de las mutaciones. El entorno escoge los mejores diseños y elimina los peores.

Nuestro modelo constituye una versión muy simplificada de la teoría de Darwin. En él, el papel del ADN lo desempeñan programas informáticos,

EN SÍNTESIS

Un nuevo programa de investigación, la metabiología, aspira a sentar las bases matemáticas de la teoría de la evolución de Darwin.

La idea básica consiste en estudiar mutaciones aleatorias de programas informáticos, el equivalente computacional del código genético.

En cierto modelo simple, la acumulación de mutaciones aleatorias opera casi tan rápido como el «diseño inteligente».

Las investigaciones futuras deberán determinar hasta qué punto tales resultados son relevantes para la verdadera evolución biológica.

mientras que el efecto del entorno queda modelizado por una función de aptitud. En particular, nuestros «organismos» son programas cuya misión consistirá en calcular un número entero lo más grande posible. Este problema se conoce en teoría de la computación como «problema del castor afanoso» (*busy beaver*, en inglés). La razón para elegirlo se debe a que, a pesar de su simplicidad, resolverlo requiere una cantidad infinita de creatividad matemática, ya que solo mediante un proceso creativo pueden inventarse funciones como la exponencial o la hiperexponencial, las cuales permiten generar números cada vez mayores.

En esencia, nuestro modelo reproduce un camino aleatorio en el espacio de programas. Partimos de un organismo simple (por ejemplo, el que calcula el número 1) y lo sometemos a una mutación aleatoria. Si como resultado obtenemos un programa capaz de calcular un número mayor, entonces este último reemplazará al primero. En caso contrario, el programa inicial permanecerá inalterado y se lo someterá a una nueva mutación. Nótese que en nuestro modelo solo hay un organismo en cada instante, no una población. Y que este solo posee material hereditario, pero carece de cuerpo y de metabolismo.

La nueva información llega desde el exterior por medio del criterio de aptitud. De hecho, para determinar si un nuevo programa es más apto o no que el anterior, nos veremos obligados a emplear un «oráculo de Turing». Ello se debe a que una mutación aleatoria siempre podrá generar un programa cuya ejecución nunca se detiene (por ejemplo, porque entra en un bucle infinito). Sin embargo, tal y como demostró Alan Turing en el año 1936, no existe ningún algoritmo que, de manera general, sea capaz de decidir si un programa dado acabará deteniéndose o no.

De modo que necesitaremos un oráculo, una idea concebida por Turing en 1939 (no figuraba en su famoso artículo de 1936) y que hace referencia a un dispositivo no algorítmico, una especie de «caja negra» capaz de determinar si un programa dado se detendrá [*véase* «Un Alan Turing desconocido», por B. Jack Copeland y Diane Proudfoot; Investigación y Ciencia, junio de 1999].

El hecho de que nuestro modelo necesite un oráculo de Turing no quiere decir que estemos postulando que tales dispositivos no algorítmicos realmente existan en la naturaleza. Simplemente, se trata de la herramienta matemática más sencilla y directa que permite modelizar la llegada de información desde el exterior y simular el efecto del entorno.

Para acabar de especificar nuestro modelo, debemos definir qué entendemos por una mutación y establecer un método para seleccionarlas al azar. En otras palabras, hemos de determinar la probabilidad de cada mutación.

A fin de demostrar que la evolución posee una capacidad creadora ilimitada, necesitaremos emplear mutaciones de tipo algorítmico. Una mutación algorítmica no es más que una función, un programa informático M que recibe como entrada un organismo inicial A y que, como salida, produce un organismo mutado, $A' = M(A)$.

Una manera muy natural de seleccionar programas al azar consiste en elegir cada uno de sus bits lanzando una moneda al aire. Ello nos permite asignar una probabilidad a cada mutación: si esta puede escribirse como un programa de N bits, la probabilidad de seleccionarla al azar será $1/2^N$. Esta técnica es bien conocida y viene empleándose en teoría de la computación desde los años setenta del pasado siglo. Además, presenta la ventaja de que las probabilidades resultantes no dependen demasiado del lenguaje de programación escogido para describir las mutaciones.

Tan solo nos falta establecer un último requisito técnico: nuestras mutaciones deberán quedar especificadas por programas autodelimitantes. Ello quiere decir que, al leer un programa bit a bit, deberemos ser capaces de decir cuándo termina. De esta manera, ninguna extensión de un programa válido será un programa válido. Si no imponemos esta condición, al calcular la probabilidad total de todos los programas posibles obtendríamos un resultado infinito (y no un número acotado entre 0 y 1, como debe satisfacer toda probabilidad).

APTITUD Y CREATIVIDAD

Ya sabemos cómo funciona nuestro modelo. Sabemos en qué consisten nuestros organismos, cómo seleccionar mutaciones al azar, cuál es el criterio para filtrar los organismos más aptos y qué modelo evolutivo de camino aleatorio resulta de todo ello. Ahora la pregunta clave es: ¿cuán rápido procede la evolución en este modelo? ¿Cuál es su grado de creatividad? ¿Qué clase de organismos surgirán de manera espontánea?

Antes de responder a esa pregunta deberemos hacer un inciso para hablar de un número sorprendente: el número Ω. También llamado probabilidad de detención, Ω se define como la suma de las probabilidades individuales de cada uno de los programas informáticos que se detienen. El conjunto formado por estos programas es infinito; sin embargo, si solo consideramos programas autodelimitantes, puede

PROGRAMAS Y PROBABILIDADES

¿Qué es un programa autodelimitante?

En el modelo evolutivo considerado aquí, las mutaciones quedan representadas por programas informáticos escogidos de manera aleatoria. Dichos programas deben satisfacer un importante requisito técnico: han de ser autodelimitantes; es decir, al leerlos bit a bit, deberemos poder decir cuándo terminan. Por ejemplo:

```
programa principal;
   subrutina A;
       ejecutar bucle;
       terminar ejecutar bucle;
   terminar subrutina A;
   subrutina B;
   terminar subrutina B;
terminar programa principal;
```

El aspecto clave reside en que, de esta manera, ninguna extensión de un programa válido proporciona un programa válido. En caso contrario, la probabilidad total asociada a todos los programas posibles sería infinita.

Esta propiedad nos permite asignar a los programas probabilidades bien definidas. Si los bits de un programa se determinan al azar, la probabilidad de obtener un programa de N bits será $1/2^N$.

Las matemáticas de la evolución

¿Puede fundamentarse la teoría de la evolución de Darwin desde un punto de vista matemático? Un modelo sencillo, basado en interpretar el código genético como un programa informático, ha permitido obtener resultados positivos en esta dirección.

Diseño sin diseñador

La teoría de Darwin ha sido calificada a menudo como «diseño sin diseñador». En ella, las mutaciones aleatorias del ADN generan nuevos organismos; después, el entorno se encarga de seleccionar los mejores diseños.



Organismo inicial (secuencia de ADN)



Mutaciones aleatorias (daños en el ADN, errores de copia...)



Nuevo organismo

Selección natural
El entorno filtra los organismos más aptos



Creatividad biológica

Programación sin programador

En el análogo computacional de la teoría de Darwin, el papel de los organismos lo desempeñan programas informáticos, los cuales experimentan cambios aleatorios. Un criterio matemático de aptitud selecciona los mejores programas.

A = ...01010111011...
Programa inicial (secuencia de bits)

Modificaciones aleatorias ejecutadas por un programa informático elegido al azar

A' = ...01110100010...
Nuevo programa

Criterio de aptitud
Se elige el programa capaz de calcular el mayor número entero

$N+N \rightarrow N\times N \rightarrow N^N \rightarrow N!^{N!} \rightarrow ...$

Creatividad matemática

¿Qué es una mutación?

Es una función algorítmica: un programa informático *M* que toma el organismo inicial como entrada y produce un nuevo organismo *A'* = *M* (*A*). Los bits de *M* se determinan al azar.

Oráculos de Turing

Para determinar si *A'* calcula un número mayor que *A*, debe emplearse un «oráculo de Turing», un proceso no algorítmico que elimina los programas que nunca se detienen. Ello se debe a que una mutación *M* escogida al azar puede resultar en un programa que nunca se detenga; también puede ocurrir que el organismo mutado no calcule ningún número.

Tasa evolutiva

La pregunta clave es cuán rápido procede la evolución en este modelo. En otras palabras: ¿cuántas mutaciones hacen falta para obtener el programa de *N* bits más apto?
La comparación con dos casos extremos pone de manifiesto que la evolución darwinista opera mucho más rápido de lo que cabría esperar.

Búsqueda exhaustiva
Examen «ciego» de todas las posibilidades
≈ 2^N mutaciones

Diseño inteligente
Selección en cada momento de la mejor mutación posible
≈ *N* mutaciones

Evolución darwinista acumulativa
Mutaciones aleatorias, preservando en cada paso el organismo más apto
≈ entre N^2 y N^3 mutaciones

demostrarse que dicha suma se encuentra bien definida y que converge hacia un numero comprendido entre 0 y 1.

El aspecto más interesante de Ω reside en que no es computable. Lo máximo a lo que podemos aspirar es a calcular unos pocos bits de su representación binaria. Ello se debe a que, si supiésemos cómo calcular los primeros *N* bits de Ω para un número *N* cualquiera, podríamos hallar una manera de resolver el problema de la detención para todos los programas de *N* bits o menos, el cual Turing demostró que carece de solución general. Lo que sí podemos hacer es calcular cotas inferiores de Ω cada vez mejores, pero sin llegar nunca a saber cuán cerca nos hallamos del valor correcto. [*Para un análisis más detallado del número* Ω, *véase* «Los límites de la razón», por Gregory Chaitin; Investigación y Ciencia, mayo de 2006].

¿Por qué hablar de Ω? Porque nuestro modelo evolutivo es tal que, con una rapidez razonable, generará buenas cotas inferiores de la probabilidad de detención. La razón para ello es que los primeros *N* bits del valor numérico de Ω forman, en esencia, el programa de *N* bits más apto; es decir, aquel capaz de calcular el mayor número entero.

Esa correspondencia surge porque conocer los primeros *N* bits de Ω prácticamente equivale a conocer la «función del castor afanoso», BB(*N*), la cual se define como el mayor número entero que puede calcular un programa de *N* bits o menos. Recordemos que conocer los primeros *N* bits de Ω permite resolver el problema de la detención para programas de hasta *N* bits. Por tanto, si conocemos los primeros *N* bits de Ω, podremos identificar todos aquellos programas de *N* bits o menos que se detienen y comprobar cuál de ellos calcula el mayor número entero.

En sentido inverso, puede demostrarse que, si conocemos BB(*N*), también sabremos el número correcto de pasos que tendríamos que dar para calcular una cota inferior de Ω y asegurarnos de que los primeros *N* bits son correctos.

Así pues, con la ayuda de un oráculo de Turing, nuestro modelo evolutivo calculará cada vez más bits de la expresión numérica de Ω. En otras palabras: extraerá información del entorno con rapidez. Pero ¿a qué velocidad?

DISEÑO INTELIGENTE Y EVOLUCIÓN DARWINISTA

La secuencia evolutiva más eficiente es aquella que, tras cada nueva mutación, logra determinar un bit adicional de Ω. Para ello habría que seleccionar en cada paso la mejor de todas las mutaciones posibles. Sin embargo, en la teoría de Darwin las mutaciones no se escogen de manera inteligente, sino al azar.

Lo más sorprendente de este modelo es que las mutaciones aleatorias hacen evolucionar a nuestros organismos a un ritmo no mucho menor que el diseño inteligente. En este último, bastan *N* pasos para determinar los primeros *N* bits de Ω. Las mutaciones aleatorias, por su parte, logran el mismo objetivo tras un número medio de pasos comprendido entre N^2 y N^3.

Compárese este resultado con lo que supondría intentar determinar los primeros *N* bits de Ω mediante un proceso de búsqueda exhaustiva, o «ciega». Esta requeriría explorar 2^N posibilidades y, por tanto, necesitaría una cantidad de tiempo muchísimo mayor. Sabemos que la evolución biológica no funciona así en absoluto. El genoma humano contiene unas $3 \cdot 10^9$ bases. Sin embargo, en los $4 \cdot 10^9$ años que lleva la vida sobre la Tierra, la evolución solo ha podido explorar una fracción insignificante de las $4^{3 \cdot 10^9}$ secuencias posibles.

¿Cómo es posible que las mutaciones aleatorias logren un resultado tan bueno? La clave reside en que las mutaciones más eficientes son también muy sencillas y, por tanto, cuentan con una alta probabilidad de aparecer en una secuencia aleatoria.

Las mutaciones del diseño inteligente operan de la siguiente manera. Si partimos de una cota inferior de Ω, intentarán primero incrementar el bit *K*-ésimo de dicha cota; después, comprobarán si el resultado continúa siendo o no una cota inferior de Ω (si no lo es, puede demostrarse que el programa mutado nunca se detiene). Si repetimos este proceso de manera sistemática para *K* = 1, 2, ..., *N*, al concluir habremos determinado de manera correcta los primeros *N* bits de Ω.

En caso de ejecutar mutaciones aleatorias, bastarán unos N^3 intentos para reproducir, por pura suerte, la misma secuencia de mutaciones del diseño inteligente. Antes o después, cualquier secuencia aparece como una subsecuencia de una serie aleatoria. Puede verse que la probabilidad de que una mutación escogida al azar incremente el bit *K*-ésimo de Ω es aproximadamente igual a $1/K$. Por tanto, aparecerá en promedio una vez por cada *K* intentos. Para obtener la secuencia correcta de mutaciones deberemos tomar la suma desde *K* = 1 hasta *K* = *N*. Cuando *N* es elevado, el valor de dicha suma se aproxima a $N^2/2$.

EL NÚMERO OMEGA

Creatividad matemática concentrada

El número Ω puede entenderse como la probabilidad de que un programa escogido al azar se detenga. Se define como la suma de las probabilidades individuales de cada uno de los programas que lo hacen:

$$\Omega = \sum_{\substack{\text{programas autodelimitantes } P \\ \text{que se detienen}}} 2^{-(\text{número de bits de } P)}$$

Los programas *P* considerados deben ser, además, autocontenidos (es decir, no aceptan entradas).

Aunque se trata de un número bien definido y que satisface $0 < \Omega < 1$, Ω es incomputable. Puede demostrarse que conocer los primeros *N* bits de su expresión binaria equivaldría a resolver el problema de la detención para todos los programas de *N* bits o menos. En 1936, Alan Turing demostró que dicho problema carece de solución general.

En el modelo considerado en este artículo, los «organismos» son programas que intentan calcular el mayor número entero posible. Desde un punto de vista formal, ese reto equivale a calcular más y más bits de la expresión binaria de Ω, una tarea de dificultad formidable que mantiene a los organismos en constante evolución.

Efectos cuánticos en la evolución biológica

¿Permiten las leyes de la mecánica cuántica nuevas sendas evolutivas?

MIGUEL ÁNGEL MARTÍN-DELGADO

La evolución biológica se nos hace visible a escala humana o macroscópica, un ámbito en el que predominan las leyes de la física clásica. Sin embargo, sabemos que los cambios evolutivos tienen su origen en las mutaciones, las cuales ocurren a las escalas atómicas y moleculares típicas de la mecánica cuántica. Así pues, resulta natural preguntarse si los efectos cuánticos desempeñan algún papel en la dinámica evolutiva. Dicha hipótesis ya fue avanzada por Erwin Schrödinger en 1944, antes incluso de que se descubriese la estructura de doble hélice del ADN. En su obra *¿Qué es la vida?*, el físico austríaco planteaba la posibilidad de que las mutaciones se debiesen a las fluctuaciones cuánticas del material genético.

¿Qué resulta más favorable, la evolución biológica en un mundo clásico o en un mundo cuántico? Esta pregunta guarda relación con dos cuestiones fundamentales. Por un lado, sabemos que la evolución biológica tal y como la conocemos opera en un mundo clásico; pero ¿es posible que, con anterioridad a dicha «era clásica», tuviese lugar una época en que la evolución estuviese dominada por leyes cuánticas? Por otro lado, tal vez en la evolución biológica actual coexistan mecanismos clásicos y cuánticos, si bien a escalas diferentes.

A pesar de su simplicidad, el modelo evolutivo de Gregory Chaitin resulta lo suficientemente concreto y preciso para abordar esas preguntas. En un trabajo cuyos resultados se publicaron en 2012 en *Scientific Reports*, se logró construir una formulación cuántica de dicho modelo y dar una primera respuesta a tales cuestiones.

En la extensión cuántica, los programas informáticos que representan el material genético de un organismo se sustituyen por programas cuánticos. Como tales, estos no constan de bits, sino de qubits: superposiciones cuánticas de los estados clásicos correspondientes a cero y uno. Del mismo modo, las mutaciones clásicas quedan reemplazadas por análogos cuánticos. Estos transforman el registro genético de acuerdo con las leyes de la física cuántica, por lo que automáticamente son unitarios (es decir, garantizan que la suma de las probabilidades asociadas a todos los procesos posibles es siempre 1). Por último, la «función de aptitud» que determina si un organismo evoluciona o no se rige, asimismo, por las leyes unitarias de la mecánica cuántica. Todo lo anterior exige introducir una versión cuántica del número Ω de Chaitin, el cual desempeña un papel clave a la hora de cuantificar las tasas evolutivas.

Dicho trabajo demostró que el ritmo al que procede la evolución en un contexto cuántico depende del grado de entrelazamiento de los estados que codifican la información genética. Si tales estados no presentan ningún entrelazamiento (son «separables»), se recuperan los resultados del modelo clásico. Sin embargo, cuando la información genética se almacena en estados cuánticos entrelazados, surgen nuevas posibilidades.

Si el grado de entrelazamiento es máximo, un escenario con evolución acumulativa implica que la evolución clásica resulta más favorable que la cuántica (es decir, que opera a mayor velocidad). En este sentido, el modelo de Chaitin explicaría por qué la evolución biológica se rige predominantemente por leyes clásicas. Sin embargo, otros grados de entrelazamiento permiten que la evolución cuántica prime sobre la clásica.

Esta línea de trabajo abre las puertas al estudio de otros aspectos. Por ejemplo, una pregunta de gran interés concierne al efecto de la decoherencia sobre el material genético (la pérdida de las correlaciones cuánticas inducida por un entorno macroscópico), que hasta ahora ha sido ignorado.

La teoría cuántica de la información puede ayudar a descubrir caminos evolutivos más complejos que los analizados hasta el momento. Ello tal vez nos permita entender mejor la manera en que la información biológica se almacena en el material genético y su devenir a lo largo de la historia.

Miguel Ángel Martín-Delgado *es catedrático de física teórica de la Universidad Complutense de Madrid.*

Un análisis más detallado muestra que no siempre bastarán $N^2/2$ mutaciones; sin embargo, N^3 sí serán suficientes.

Así pues, y a pesar de su enorme simplicidad, nuestro modelo exhibe un comportamiento darwinista, en el que la paciencia y el azar reemplazan a la inteligencia.

Este parece ser el primer modelo matemático en el que resulta posible demostrar que la evolución continúa para siempre sin estancarse jamás. Ello se debe a que se trata de un modelo con un grado de simplificación enorme (sin duda, lo que los físicos llamarían un «modelo de juguete») y a que hemos obligado a nuestros organismos a resolver una tarea de dificultad extraordinaria: el problema del castor afanoso. En esencia, este equivale a resolver el problema de la detención de Turing, bien conocido en teoría de la computación por ser irresoluble.

El modelo que hemos esbozado aquí fue concebido para demostrar algunos teoremas relacionados con la evolución en biología. No sin cierto optimismo, hemos decidido bautizar esta línea de investigación como metabiología. Los primeros pasos se antojan esperanzadores, pero aún queda por ver su relevancia y su grado de aplicabilidad a la verdadera evolución biológica.

En última instancia, nuestra meta es unificar la teoría de la computación y la biología teórica. Si esta tarea puede llevarse a término, habremos demostrado que, tal y como argumenta Venter, el ADN es el programa informático de la vida.

PARA SABER MÁS

Meta math! The quest for Omega. Gregory Chaitin. Pantheon, Nueva York, 2005.
Matemáticas, complejidad y filosofía: Conferencias pronunciadas en Canadá y Argentina. Gregory Chaitin. Editorial Midas, Valparaíso, 2011.
Life as evolving software. Gregory Chaitin en *A computable universe: Understanding and exploring nature as computation*. Dirigido por Héctor Zenil. World Scientific, Singapur, 2012.
On quantum effects in a theory of biological evolution. Miguel Ángel Martín-Delgado en *Scientific Reports* n.º 2, artículo 302, 12 de marzo de 2012.
Demostrando a Darwin: La biología en clave matemática. Gregory Chaitin. Tusquets, Barcelona, 2013.



BIOQUÍMICA

Moléculas especulares

En la naturaleza los aminoácidos levógiros constituyen la regla. Sin embargo, cada vez se descubren más excepciones

Sarah Everts

Si irrita a un ornitorrinco macho durante la época de cría, puede terminar atrapado por sus rechonchas patas traseras, con unos amenazantes espolones afilados armados con veneno. El doloroso tóxico hace que los competidores machos cojeen y es una defensa útil contra humanos y perros molestos. Su composición es un tanto extraña, como podría esperarse de un mamífero famoso por su rareza en la puesta de huevos y el pico de pato. Contiene un tipo de moléculas que los biólogos pensaban que no existían de forma natural fuera del mundo microscópico de las bacterias.

Esas moléculas corresponden a imágenes especulares de los aminoácidos que las células encadenan para fabricar todas las proteínas que necesitan para vivir. Las imágenes especulares constan de los mismos átomos que componen los 20 o más aminoácidos estándar en el conjunto de herramientas de la biología, y los átomos se hallan unidos uno a otro en el mismo orden. Sin embargo, la orientación de los enlaces diverge ligeramente, dando lugar a estructuras que difieren de los aminoácidos clásicos de la misma forma en que la mano derecha difiere de la izquierda. Sin embargo, estas dos formas no son intercambiables en las reacciones biológicas. De hecho, los aminoácidos clásicos se denominan levógiros, y sus imágenes especulares dextrógiros.

Tiempo atrás se asumió que los aminoácidos dextrógiros cumplían una función mínima en los organismos superiores porque no encajarían —y, por tanto, no podrían funcionar— en la maquinaria molecular de la mayoría de las plantas y animales. Sin embargo, en los últimos años se ha descubierto una variedad sorprendente de aminoácidos dextrógiros biológicamente activos: desde sustancias que producen las langostas para iniciar el acto sexual, hasta una droga alucinógena utilizada por cazadores indígenas en Perú. Lo más curioso es que estos aminoácidos dextrógiros desempeñan funciones importantes en la fisiología humana, por lo que encierran un gran potencial para el desarrollo de nuevos tratamientos, incluidos el de la fibrosis quística, la esquizofrenia y la degeneración macular.

EN SÍNTESIS

Los aminoácidos pueden adoptar formas que, al igual que nuestras manos derecha e izquierda, son imágenes especulares la una de la otra. Cuando surgió la vida en la Tierra, esta favoreció a los aminoácidos levógiros sobre los dextrógiros para llevar a cabo la actividad celular.

Durante largo tiempo, las únicas excepciones a ese patrón se habían hallado en el mundo microscópico de las bacterias. Sin embargo, en estos últimos años, se han encontrado cada vez más ejemplos en organismos superiores, incluidos los humanos.

Los investigadores biomédicos están estudiando las aplicaciones de los aminoácidos exóticos para tratar enfermedades como la esquizofrenia, la fibrosis quística y la degeneración macular.

DAN SAELINGER

Solomon Snyder, neurocientífico de la Universidad Johns Hopkins, quien realizó gran parte de las primeras investigaciones sobre la función de los aminoácidos dextrógiros en el cerebro, comenta que se encontró con una resistencia considerable cuando intentó publicar sus primeros trabajos sobre el tema. «Cuando en ciencia se propone algo radicalmente nuevo o diferente, siempre hay quien dice: "esto es ridículo".» Sin embargo, para él, esas moléculas eran interesantes precisamente porque parecían romper la primera regla de la biología de los mamíferos.

Bioquímicamente hablando, la inversión de un aminoácido levógiro para obtener su imagen especular suele ser un proceso sencillo, de pocos pasos. Por tanto, probablemente fue inevitable que la evolución experimentase con la fabricación de aminoácidos dextrógiros. «La naturaleza viene utilizándolos desde hace tiempo», apunta Richard Losick, biólogo celular de la facultad de medicina de la Universidad Harvard. «Simplemente hemos tardado en darnos cuenta de ello.»

UN ACCIDENTE ÚTIL

¿Cómo es que los aminoácidos levógiros llegaron a predominar sobre sus hermanos dextrógiros —en tal grado que las funciones biológicas de estos pasaron inadvertidas, a pesar de conocerse su existencia desde finales de la década de 1800? Algunos científicos sostienen que la parte levógira deriva del equivalente cosmológico del lanzamiento de una moneda. Las primeras entidades químicas con capacidad de autorreplicación usaban aminoácidos levógiros, y este sesgo se habría mantenido por «derechos de antigüedad», sugiere Robert Hazen, geofísico e investigador de los orígenes de la vida en la Universidad George Mason. Otra teoría sostiene que la luz polarizada procedente de una estrella que giraba rápidamente en nuestra galaxia primigenia destruyó de forma selectiva los aminoácidos dextrógiros, aumentando la probabilidad de que los levógiros se convirtieran en los bloques constructores de la vida. Las dos formas también se conocen como L-aminoácidos y D-aminoácidos, respectivamente, por las palabras latinas para izquierda (*laevus*) y derecha (*dexter*).

Establecida la elección, la evolución tuvo un claro incentivo para perpetuar una forma aminoácida dominante, explica Gerald Joyce, quien estudia los orígenes de la vida en el Instituto de Investigación Scripps, en La Jolla, California. «Por analogía, la convención en los países occidentales es saludar a la gente dándose la mano derecha. Funcionaría igual de bien si todos estuviésemos de acuerdo en darnos la mano izquierda, pero si no hubiese convenio, habría muchos encuentros difíciles.» Por tanto, la mayor parte de la maquinaria de las células vivas, desde las enzimas que producen los aminoácidos hasta los complejos ribosomas, que encadenan estos uno tras otro para formar las proteínas, es compatible solo con los L-aminoácidos, no con sus homólogos D.

En realidad, la temprana decisión de la vida en favor de los aminoácidos levógiros puede haber influido en las «preferencias» observadas en otra clase de compuestos orgánicos: los carbohidratos. En la última década, varios grupos de investigación han demostrado que el predominio de ciertos aminoácidos levógiros simples en soluciones experimentales que imitan el caldo primigenio que pudo haber existido en la Tierra hace cuatro mil millones de años tiende a favorecer (por complejos motivos químicos) la formación de carbohidratos dextrógiros, la orientación observada en el ámbito biológico.

Las excepciones a la regla levógira para los aminoácidos naturales recibió mayor atención en los años noventa del siglo xx, después de que Snyder demostrase que algunos compuestos dextrógiros operaban a modo de neurotransmisores en el cerebro humano. En 2002, Philip Kuchel, químico en la Universidad de Sídney, determinó que el veneno del ornitorrinco contenía D-aminoácidos. En 2009, investigadores de Harvard y del Instituto Médico Howard Hughes comunicaron que ciertos D-aminoácidos realizaban funciones inesperadas en las paredes bacterianas. En 2010 se descubrió que ciertas comunidades de bacterias que se extienden en forma de biopelículas sobre varias superficies (desde las aguas termales hasta equipos médicos) parecían usar D-aminoácidos como una señal de que debían dispersarse.

En los humanos, se ha visto que el aminoácido D-aspartato es un neurotransmisor implicado en el desarrollo normal del cerebro. Por otro lado, la D-serina se asocia con el aminoácido L-glutamato para coactivar moléculas neuronales esenciales para la plasticidad sináptica, una propiedad que, a su vez, resulta clave para el aprendizaje y la formación de recuerdos. La D-serina también parece desempeñar un papel importante en la esquizofrenia: quienes padecen esta enfermedad poseen cantidades inferiores de D-serina en el cerebro, un descubrimiento que ha motivado a las compañías farmacéuticas a buscar formas de complementar los niveles de D-serina como un posible tratamiento. Sin embargo, un exceso de D-serina puede causar problemas en otras circunstancias: en las personas que sufren un accidente cerebrovascular puede conducir a un aumento del daño cerebral. Los investigadores también están desarrollando fármacos que disminuyan los niveles de D-serina para mitigar tan perjudiciales consecuencias.

Nuestras fábricas celulares producen solo L-aminoácidos. ¿Cómo hemos llegado a tener también D-aminoácidos? Snyder encontró que las células cerebrales no sintetizan D-serina a partir de cero. En su lugar, fabrican una enzima que invierte la quiralidad del aminoácido serina de la forma L a la D. Es una forma práctica de aprovechar los abundantes niveles de L-aminoácidos ya disponibles en la célula.

La vida utiliza la misma estrategia cuando un D-aminoácido forma parte de un péptido (una pequeña cadena de aminoácidos), como en el veneno del ornitorrinco. En estos casos, el fiable ribosoma construye el péptido a partir de L-aminoácidos. A continuación, una enzima transforma uno de los aminoácidos de la cadena en su álter ego D. Al apoyarse en la maquinaria que produce o concatena los L-aminoácidos, la naturaleza no necesita desarrollar todo el equipo de enzimas biosintéticas dextrógiras que se requerirían para construir una molécula dextrógira, explica Günther Kreil, químico de la Academia Austríaca de Ciencias de Viena, quien en 2005 encontró una enzima que las ranas arbóreas venenosas de Sudamérica utilizan para fabricar los D-aminoácidos presentes en su veneno.

Kreil empezó a interesarse por ese tóxico cuando se enteró de que los matsés, un grupo indígena de Perú, usaban en sus rituales de caza un potente alucinógeno elaborado a base de péptidos que contenían un D-aminoácido, extraídos de la piel de la rana arbórea *Phyllomedusa bicolor*. Primero, los matsés queman su tórax. A continuación, aplican el extracto de piel de rana a las heridas chamuscadas; ello les provoca inmediatamen-



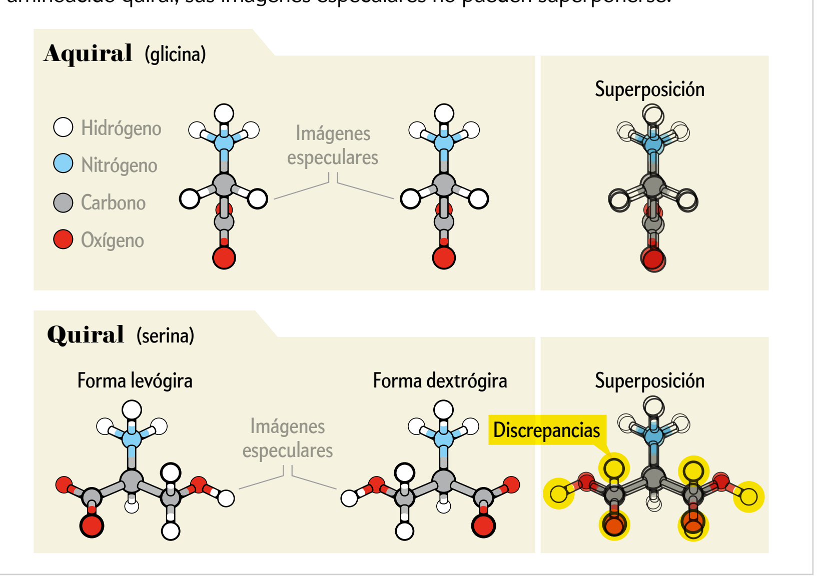
Sarah Everts es la corresponsal en Berlín para el semanario *Chemical & Engineering News*. También escribe un blog sobre arte y ciencia en Artful Science.

te diarrea y taquicardia, y les deja luego inconscientes durante unos instantes. Al despertar, notan los sentidos intensificados y una sensación de fuerza sobrehumana. Aunque el péptido de la rana contiene un solo D-aminoácido (el resto son L-aminoácidos), sin este la droga carecería de efecto alucinógeno.

UNA PRUEBA PRÁCTICA

Cómo detectar una molécula especular

De los veintialgún aminoácidos del conjunto estándar de herramientas de la naturaleza, solo la glicina (*arriba*) es aquiral; ello significa que no exhibe ni propiedades dextrógiras ni levógiras, y que las imágenes especulares de la molécula coinciden exactamente la una con la otra si se superponen. Por el contrario, la serina es un aminoácido quiral; sus imágenes especulares no pueden superponerse.



EL MUNDO DE LAS SOMBRAS

Aunque los D-aminoácidos se hallan en los venenos de una amplia variedad de organismos, en otras criaturas estas moléculas tienen objetivos más pacíficos. Las langostas utilizan los D-aminoácidos para catalizar el cortejo y mantener sus niveles de sales en orden.

Con todo, los principales usuarios de los D-aminoácidos siguen siendo los microorganismos —aunque incluso aquí los investigadores están descubriendo nuevas funciones para las moléculas dextrógiras—. La mayoría de las bacterias construyen sus paredes celulares a partir de una matriz pegajosa formada por azúcares y proteínas (peptidoglicano), retocada con D-alanina y otros D-aminoácidos. En 2009, Matthew Waldor, de Harvard y Howard Hughes, encontró que las bacterias también reforzaban el peptidoglicano con un mortero que incluye D-metionina y D-leucina. Estos D-aminoácidos también pueden remodelar el peptidoglicano de los vecinos bacterianos —incluso de especies distintas—, lo que sugiere que los microorganismos pueden utilizar las moléculas para coordinar funciones como la activación de la fluorescencia o la construcción de una biopelícula. Comprender el modo en que estas bacterias aprovechan los D-aminoácidos para su comunicación facilitaría el desarrollo de fármacos o productos que rompieran las biopelículas de nuestros dientes, de los pulmones de pacientes con fibrosis quística, de tuberías de combustible y de componentes médicos como los catéteres.

Un motivo por el que las bacterias y las criaturas venenosas emplean D-aminoácidos es que cuando estos se hallan en un péptido o en una proteína de mayor tamaño, no son degradados fácilmente por las enzimas de su huésped o enemigo. Todos los organismos tienen enzimas proteasas, cuya función es degradar con rapidez y reciclar los L-aminoácidos de las proteínas, pero no los D. De hecho, los expertos en desarrollo de fármacos han intentado añadir D-aminoácidos a los péptidos y proteínas terapéuticos para eludir estas proteasas de limpieza y permitir así que los fármacos duren más en el organismo.

Ahora que los expertos están explorando con mayor interés este extraño y nuevo mundo de los aminoácidos dextrógiros, se preguntan qué otras funciones desempeñan estas moléculas. Losick y sus colaboradores especulan que al menos algunos de los D-aminoácidos producidos por los tres trillones de bacterias que viven sobre nuestra piel, el tracto digestivo y cualquier lugar del cuerpo, pueden ser importantes para el bienestar, la salud e incluso el comportamiento de los humanos.

Una de las grandes cuestiones actuales de la investigación sobre los D-aminoácidos es si alguna otra parte del cuerpo humano, además del cerebro, los produce. Las pruebas preliminares resultan sugerentes. El grupo de Yoko Nagata, de la Universidad Nihon de Tokio, ha hallado D-aminoácidos en la saliva humana. Investigadores liderados por Kenji Hamase, de la Universidad Kyushu de Japón, han observado, en el páncreas de ratas, D-alanina empaquetada a altas concentraciones en las células beta secretoras de insulina. Asimismo, en experimentos preliminares recientes en su laboratorio de Australia, Kuchel ha descubierto, en el corazón de ratón y humano, enzimas que convierten los L-aminoácidos en D-aminoácidos, similares a las del veneno del ornitorrinco.

Sin embargo, la función de estas enzimas en la fisiología humana sigue siendo, en la opinión de Kuchel, «un absoluto misterio». Por lo menos la idea de que podrían desempeñar un papel importante ya no parece ridícula.

PARA SABER MÁS

The new ambidextrous universe: Symmetry and asymmetry from mirror reflections to superstrings. Tercera edición revisada. Martin Gardner. Dover, 2005.

High dose D-serine in the treatment of schizophrenia. Joshua Kantrowitz et al. en *Schizophrenia Research*, vol. 121, n.º 1, págs. 125-130, agosto de 2010. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3111070.

D-amino acids in chemistry, life sciences, and biotechnology. Dirigido por Hans Brückner y Noriko Fujii. Wiley, 2011.

Emerging knowledge of regulatory roles of D-amino acids in bacteria. Felipe Cava et al. en *Cellular and Molecular Life Sciences*, vol. 68, n.º 5, págs. 817-831, marzo de 2011. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3037491

EN NUESTRO ARCHIVO

La quiralidad del universo. Roger A. Hegstrom y Dilip K. Kondepudi en *IyC*, marzo de 1990.

GRAPHIC CONSULTANT: MARTIN MA, JOHNS HOPKINS UNIVERSITY SCHOOL OF MEDICINE; JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

por Norbert Treitz



Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburgo-Essen.

Trampillas, yoyós y billares

Las sorprendentes propiedades de rotación de los sólidos rígidos

Levante una trampilla unos 30 grados y suéltela. Si no dispone de una, eleve un listón o el palo de una escoba por un extremo y déjelo caer, mientras el otro permanece apoyado en tierra (o se desliza hacia un lado, lo que no afectará demasiado el experimento). ¿Llegará al suelo más rápido que una canica que se precipita desde la misma altura?

Debido a la velocidad con la que sucederá todo, lo ideal sería filmar los acontecimientos y reproducirlos después a cámara lenta. No obstante, si deseamos realizar nuestro experimento con medios más tradicionales, podremos recurrir al siguiente truco: coloque primero una canica dentro de un pequeño cuenco y sitúelo en la parte superior del listón, muy cerca del extremo. Ponga otro recipiente cerca, pero ligeramente desplazado hacia el interior (hacia el eje de giro).

Tras la caída, observará cómo la canica ha ido a parar al segundo cuenco. Dado que solo ha podido llegar allí desde arriba, nuestro experimento demuestra que la pequeña bola (una masa puntual) tarda en caer algo más que el extremo del listón. Como consejo práctico, tal vez pueda conseguir uno de los cubiletes de plástico que, en tiempos de la fotografía analógica, se usaban para guardar carretes. La tapa y el cubo recortado desempeñarán a la perfección la función de cuencos. Solo deberá revestir el recipiente de llegada con un poco de algodón u otro material blando, a fin de evitar que la bola salga volando una vez que el listón toque el suelo.

La inclinación inicial del listón ejerce un papel fundamental. Un valor de aproximadamente 30 grados con respecto a la horizontal resulta óptimo, ya que en el momento en que el listón golpea el suelo, la altura de la bola es mayor que en otros casos. También puede fijar una tabla a una mesa con ayuda de una bisagra, aunque ello tal vez reste encanto a este experimento tan rudimentario.

¿Dónde está el imán?

¿Cómo es posible que la gravedad actúe sobre un cuerpo con una aceleración de caída mayor que *g*? En cierta ocasión me preguntaron dónde se encontraba escondido el imán que hacía posible tal cosa.

El experimento no esconde ninguna trampa. Pensemos en el listón como si estuviera compuesto de bloques individuales que, antes de comenzar, se encuentran pegados, pero que luego se sueltan. En tal caso cada bloque se precipitará, de manera independiente de los demás, con la aceleración habitual de una caída libre. Sin embargo, si cada bloque se halla unido a su vecino, todos llegarán al suelo en el mismo instante. Por tanto, y a diferencia de lo que ocurre en una caída libre, los más cercanos al extremo inferior se moverán más despacio que los bloques externos.

Vemos así que las uniones entre los bloques transportan energía hacia el exterior, lo cual implica que una fuerza actúa sobre ellas. Esa tensión puede llegar a sobrecargar las uniones, como ocurre con algunas grandes chimeneas de ladrillo cuando se derriban (*véase la imagen de la página siguiente*).

A veces se afirma que el centro de gravedad del listón cae con aceleración *g*. Esta explicación, sin embargo, no casa bien con el principio de conservación de la energía: solo cuando el listón cae absolutamente libre (en particular, sin ningún tipo de apoyo en el suelo) cada elemento de volumen transforma la energía potencial gravitatoria en energía cinética, de forma no muy diferente de lo que ocurre con una masa puntual.

En el caso del listón, la energía potencial debe además generar una rotación acelerada, por lo que la misma caída solo puede producir una aceleración vertical algo inferior a la habitual. Las simulaciones por ordenador del experimento muestran que, para ángulos lo suficientemente pequeños, la punta exterior llega al suelo con una aceleración vertical 1,5 veces superior a *g*. El centro de gravedad de la tabla, por su parte, experimentará una aceleración igual a la mitad de la anterior; es decir, (3/4)*g*.

En realidad, nuestro listón no es más que un péndulo: un sólido rígido en el que el punto de giro se encuentra fijo. Este caso recibe el nombre de «péndulo físico», ya que sus propiedades no resultan tan ideales como las del péndulo «matemático», compuesto por una masa puntual y una barra rígida de masa cero. Cuando este último se desvía muy poco de su posición de equilibrio, su movimiento queda descrito con muy buen grado de aproximación por un oscilador armónico (un muelle ideal). No obstante, aquí hablamos de desviaciones con respecto al punto de equilibrio mayores de 90 grados, por lo que la aproximación armónica no resulta de mucha ayuda.

Para especificar el movimiento de rotación de una barra, podríamos aplicar a cada uno de sus puntos la segunda ley de Newton (fuerza igual a masa por aceleración), pero con una condición adicional: cada elemento está obligado a describir un arco de circunferencia. Por tanto, la aceleración efectiva será igual a la componente tangencial a lo largo de dicha trayectoria. Ello introduce un factor de $\cos\phi$ en las ecuaciones, donde ϕ representa el ángulo del listón con respecto a la horizontal en cada momento.

De esta manera, se suman (o, en términos técnicos, se integran) las fuerzas en todos los puntos de la barra y se obtiene el equivalente a la ley de Newton para un cuerpo en rotación: el momento de las fuerzas exteriores es igual al momento de inercia por la aceleración angular. En nuestro caso, el momento de las fuerzas, M, y el momento de inercia, I, vienen dados por las integrales:

$$M = \frac{mg}{L}\cos\phi\int_0^L r\,dr, \quad I = \frac{m}{L}\int_0^L r^2 dr;$$



SOBRECARGA DE TENSIÓN: Cuando un objeto alargado se desploma, el extremo final debe moverse a mayor velocidad que la base, lo que implica que la unión entre sus partes transporta energía hacia el exterior. Si ese esfuerzo es excesivo, el objeto puede quebrarse durante la caída, como esta chimenea.

CORTESÍA DE BRIGHARD KREMSER, ROBERT ZELLER GMBH & CO KG / EMPRESA DE DEMOLICIONES DE OFFENBACH

donde L designa la longitud del listón (cuyo eje de giro se sitúa en el origen, $r = 0$) y m, su masa, que podemos suponer distribuida de modo uniforme. Ambas integrales se calculan con facilidad y dan como resultado $M = mg(L/2)\cos\phi$ e $I = mL^2/3$. En lo que concierne al momento de las fuerzas, el resultado coincide con el que obtendríamos al situar toda la masa en el centro de gravedad del listón.

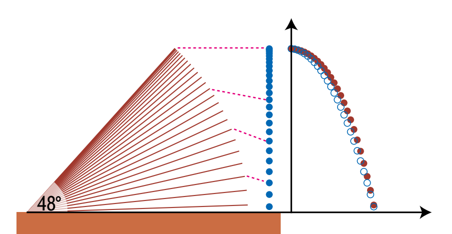
El factor 1/3 en el momento de inercia resulta decisivo para el asombroso comportamiento del listón. Si su masa no estuviera repartida de forma homogénea, sino aglutinada en sus extremos, no obtendríamos un resultado tan espectacular. De hecho, si toda la masa estuviese concentrada en el extremo superior de la tabla, su aceleración no superaría la de un cuerpo puntual en caída libre.

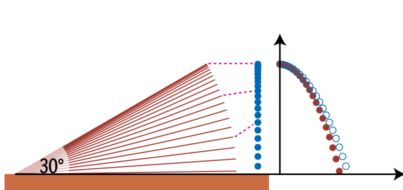
De la ley para el movimiento de rotación puede deducirse una ecuación diferencial ordinaria para el ángulo ϕ. Debido a la importancia que en su día cobró el péndulo físico en la fabricación de relojes, se estudió y desarrolló una familia especial de funciones para describir sus movimientos: las integrales elípticas. Hoy en día el problema puede resolverse de manera mucho más sencilla con ayuda de un ordenador. Se programa la suma de todas las magnitudes relevantes en determinados instantes de tiempo y se supone que, en los breves intervalos intermedios, permanecen constantes.

Jakob Steiner y el juguete giratorio

El hombre de a pie lo llama yoyó; el físico experimental en sus primeras prácticas de laboratorio, rueda de Maxwell. Hablamos de un objeto circular que gira sobre un eje, atado a uno o dos cordones paralelos. El movimiento del ingenio queda caracterizado por su masa, m, su momento de inercia, I (con respecto el eje de rotación) y su radio de giro, r.

En general, el radio de giro suele ser mucho menor que el del disco que forma el yoyó, aunque no tiene por qué ser así (también puede hacerse girar un cilindro en torno a su borde exterior). Lo importante es la distribución de masa del cilindro. En el caso extremo en que toda la masa se encuentra concentrada en el eje (imaginemos un eje muy fino y pesado insertado en un disco de poliestireno), ponerlo en rotación no costará ninguna energía: rodará hacia abajo de tal modo que su centro de gravedad avance con la aceleración habitual de un cuerpo en caída libre.





EN ESTA SIMULACIÓN POR ORDENADOR, un listón (*marrón*) se ha inclinado 75° (*izquierda*), 48° (*centro*) y 30° (*derecha*) sobre la horizontal. Al soltarlo, una canica (*azul*) se precipita en caída libre desde la misma altura que el extremo de la tabla. Con una inclinación de 70°, la bola adelanta al listón; con 48°, el extremo de la tabla alcanza la bola justo cuando ambos objetos golpean el suelo. Con una inclinación de 30°, la punta del listón se mueve desde el principio a mayor velocidad que la bola. Las líneas rojas punteadas unen posiciones a tiempos iguales.

Otro caso particular, más realista, nos lo proporciona un cilindro hueco. Conseguiremos una buena aproximación si tomamos una lata de conservas y extraemos la base y la tapa. Si r y m denotan el radio y la masa del cilindro, su momento de inercia con respecto a su eje geométrico valdrá mr^2. En cada instante, sin embargo, el eje en torno al cual gira el objeto será una línea horizontal tangencial al cilindro (la que pasa por el punto desde el que se desenrolla el hilo). Para calcular el momento de inercia con respecto a dicho eje, deberemos sumar mr^2 al resultado anterior, con lo que obtenemos $2mr^2$. Este es el resultado del teorema de Steiner, formulado en el siglo XIX por el matemático suizo Jakob Steiner. Del mismo modo, un cilindro macizo, cuyo momento de inercia con respecto a su eje geométrico vale $mr^2/2$, presenta, con respecto a un eje tangencial, un momento de inercia igual a $(3/2)mr^2$.

Consideremos ahora un objeto genérico caracterizado por un radio de giro r, una masa arbitraria m y un momento de inercia I_0 con respecto al eje que pasa por su centro; es decir, $I = I_0 + mr^2$ con respecto al eje de rotación. Su peso, mg, induce un momento $M = mgr$ y, con ello, una aceleración angular $\alpha = M/I = (mgr)/(I_0 + mr^2)$. El centro de gravedad cae con una aceleración $a = \alpha r$. Vemos que, para un valor ínfimo de I_0 (como ocurriría con un cilindro de poliestireno con un eje muy pesado), recuperamos $a = g$. En el resto de los casos ($I_0 > 0$), la aceleración del centro de masas será menor que g.

	Momento de inercia	
	Eje central I_0	Eje lateral $I_0 + mr^2$
Cilindro macizo	$\frac{1}{2}mr^2$	$\frac{3}{2}mr^2$
Cilindro hueco	mr^2	$2mr^2$
Esfera maciza	$\frac{2}{5}mr^2$	$\frac{7}{5}mr^2$
Esfera hueca	$\frac{2}{3}mr^2$	$\frac{5}{3}mr^2$

Imaginemos ahora un disco cuyo momento de inercia con respecto a su eje geométrico igualase al de una barra que gira con respecto a uno de sus extremos. Su distribución radial de masa no sería homogénea; pero, en cualquier caso, tendríamos $I_0 = mr^2/3$. El momento de inercia con respecto al eje de giro sería por tanto $I = (4/3)mr^2$, y la aceleración con la que cae su centro de gravedad, $(3/4)g$.

No debemos obsesionarnos demasiado con la distribución de masa de nuestros objetos rotatorios. En realidad, basta con conocer la magnitud adimensional $f = I_0/(mr^2)$, a la que llamaremos «factor de forma». En el caso del cilindro hueco ideal, cuya masa se concentra en una superficie infinitamente delgada (la lata de conservas), tenemos $f = 1$; para el listón, $f = 1/3$. Al reescribir la aceleración obtenemos que $a = g/(1 + f)$, por lo que el cordón soportará una fuerza igual a $m(g - a) = mgf/(1 + f)$.

Si atamos a una báscula el cordón de un yoyó que cae, esta marcará un «peso» algo menor que el del objeto en reposo. Pero ¿qué ocurrirá cuando esté subiendo? En ambos casos, la aceleración apuntará hacia abajo y la báscula marcará un peso reducido; también cuando el yoyó se encuentre en su punto más alto y se detenga por un instante, antes de que la velocidad angular y la de traslación inviertan sus sentidos. De hecho, si sostenemos con la mano el hilo de un yoyó ascendente pero no lo miramos, no notaremos nada cuando alcance dicho punto.

En el punto inferior de su trayectoria, en cambio, el sentido de giro se invierte cuando la velocidad angular es máxima, por lo que experimentaremos un fuerte tirón. De estar el extremo del hilo atado a una báscula, esta registraría durante unos instantes un peso mayor que el habitual. Sin embargo, si calculamos el promedio temporal de todas mediciones de la balanza, el resultado será idéntico al peso del objeto en reposo. Algo no muy distinto de lo que ocurre cuando alguien salta sobre una báscula (en tal caso, hay períodos relativamente largos en los que la aguja llega a marcar incluso cero).

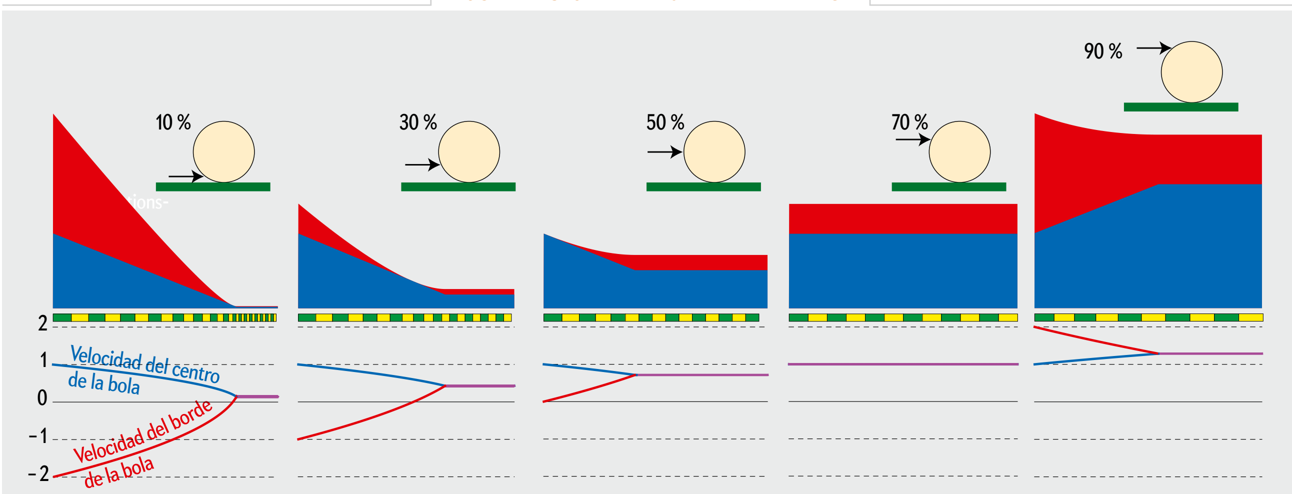
Bolas de billar

De igual modo, la transformación de la energía de traslación en energía de rotación nos depara alguna que otra sorpresa en las mesas de billar. En principio, una bola de billar no cuenta con ninguna razón para rodar si se la golpea en dirección horizontal y con el taco apuntando a su centro. Sin embargo, si bien en un primer momento se deslizará en línea recta en el sentido del golpe, después el rozamiento con el tapiz convertirá parte de esa energía cinética de traslación en un movimiento rotatorio (algo parecido ocurre con un corredor que tropieza de repente y que acaba dando una voltereta hacia adelante). Conviene ignorar otros efectos, como el rozamiento con el aire o la resistencia a la rodadura, pues solo hacen más farragoso nuestro experimento, pero no añaden nada interesante.

Si el taco no golpea en el centro de la bola, además del momento lineal estaremos comunicando a la bola un momento angular. Este influirá en la trayectoria del objeto incluso después del golpe, debido al rozamiento por deslizamiento sobre el tapiz (lo que los jugadores denominan «efecto»). De hecho, puede imprimirse una trayectoria curvilínea si se golpea la bola en un lado.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN NORBERT TREITZ

RODADURA Y DESLIZAMIENTO



Una bola de billar golpeada horizontalmente a diferentes alturas (*expresadas en porcentajes del diámetro de la bola*) experimenta al principio una mezcla de deslizamiento y rotación. Debido al rozamiento con el tapiz, la bola acabará rodando: eso ocurre en el momento en que la velocidad del centro de masas y la de un punto de la superficie se igualan (*las curvas roja y azul se unen en la línea violeta*). En estas gráficas, las velocidades del centro y el borde de la bola (*en unidades arbitrarias*) no se representan en el tiempo, sino sobre la trayectoria. Las barras amarillas y verdes indican un mismo intervalo temporal.

Tras un impacto bajo (*izquierda*), la bola gira primero hacia atrás y al final rueda muy despacio. Al golpearla a una altura media (*centro*), la velocidad de traslación también se ve mermada debido al movimiento de rotación. Sin embargo, si el impacto tiene lugar a una altura igual al 70 por ciento del diámetro la bola, esta comenzará a rodar desde el principio. Si el golpe tiene lugar en la parte superior (*derecha*), la bola girará primero con rapidez, luego su movimiento de traslación se acelerará y, finalmente, comenzará a rodar sin deslizamiento.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN NORBERT TREITZ

Si el impacto se propina en la parte inferior de la esfera, la velocidad del desplazamiento hacia delante habrá disminuido cuando la bola comience a rodar en dicho sentido. Si el golpe tiene lugar en la zona superior, parte de la energía de rotación inicial se transformará en energía de traslación, por lo que la velocidad de desplazamiento de la bola aumentará. En este último caso, la bola rodará con rapidez. Tras un impacto en la parte más baja, en cambio, lo hará más despacio.

¿A qué altura debemos golpear una bola de billar para que comience a rodar sin deslizarse desde el primer momento? Sabemos que no en el centro, ya que entonces empezará deslizándose sin rodar. De nuevo, el cálculo de momentos de inercia acude a nuestra ayuda. Dado que para una esfera maciza el momento de inercia es $I_0 = (2/5)mr^2$, obtendremos que la altura del impacto óptimo corresponde a un 70 por ciento del diámetro de la bola.

por Alejandro Pérez Carballo



Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.

Limitaciones expresivas

¿Qué clase de enunciados no pueden formularse en el lenguaje de la aritmética?

Consideremos un lenguaje formal genérico L. ¿Es posible determinar hasta dónde alcanza su poder expresivo? En otras palabras, ¿podemos caracterizar qué clase de enunciados no tienen cabida en L?

Comencemos por decir que un conjunto de enunciados de L es *razonable* si podemos programar un ordenador para que genere, uno a uno, todos los enunciados de dicho conjunto. Una de las consecuencias del teorema de incompletitud de Gödel [*véase* «Ordenadores y números naturales», por Agustín Rayo; Investigación y Ciencia, abril 2012] es que ningún conjunto razonable de enunciados puede contener toda la verdad sobre los números naturales. Pero ¿qué sucedería si nos permitiésemos conjuntos de enunciados tan complejos como fuese necesario? ¿Podríamos formular todo lo que hay que decir sobre los números naturales?

La respuesta, sin duda, depende de qué lenguaje utilicemos. Uno que solo contuviese nombres propios no nos permitiría llegar muy lejos. Sin embargo, si dispusiéramos de un lenguaje muy rico (uno que nos permitiese formular todos los teoremas fundamentales de la aritmética, por ejemplo), tal vez no fuese una locura pensar que podríamos capturar toda la verdad sobre los números naturales. Por desgracia, semejante objetivo resulta mucho más difícil de lo que parece.

El lenguaje de la aritmética

Comencemos por un lenguaje que se nos presenta como el mejor candidato para obtener una descripción completa de los números naturales: el lenguaje de la aritmética, L_A.

L_A contiene nombres como '0', '1', '2', '3'... para cada uno de los números naturales 0, 1, 2, 3... Incluye, además, el símbolo '+' para la adición, '×' para la multiplicación y '=' para la identidad. Gracias a ello, podemos formular enunciados como:

(1) $1 + 2 = 3$,

(2) $1 + 2 = 4$.

Pero L_A nos permite decir cosas mucho más interesantes. Ello se debe a que contiene también símbolos lógicos: '∨' para la disyunción, '&' para la conjunción, '¬' para la negación y '→' para la implicación material. Además, incluye los cuantificadores de primer orden '∃' (léase «existe») y '∀' (léase «para todo»).

Así, para decir que 5 es mayor que 4, basta con enunciar que, para todo número natural x, $5 + x$ no es igual a 4:

(3) $\forall x \neg(5 + x = 4)$.

También podemos expresar que un número m es mayor que n:

(4) $\forall x \neg(m + x = n)$.

L_A nos permite enunciar que todo número tiene un sucesor; es decir, que para todo x existe un número y tal que y se obtiene al añadir 1 a x:

(5) $\forall x\ \exists y\ (x + 1 = y)$.

De manera similar, podemos establecer que todo número distinto de 0 cuenta con un predecesor:

(6) $\forall x\ (\neg(x = 0) \rightarrow \exists y\ (y + 1 = x))$.

Con un poco de paciencia, podremos formular enunciados aún más complejos, como la conjetura de Goldbach. No obstante, si bien es mucho lo que podemos decir en L_A, hay ciertas propiedades de los números naturales que no pueden enunciarse en este lenguaje. Por ejemplo, podemos decir que todo número que no sea mayor que 4 tiene que ser igual a 0, 1, 2, 3 o 4:

(7) $\forall n\ (\neg(\forall x \neg(n + x = 4)) \rightarrow (n = 0 \vee n = 1 \vee n = 2 \vee n = 3 \vee n = 4))$.

Sin embargo, jamás podremos enunciar que todo número natural es igual a alguno de los números 0, 1, 2, 3, 4... Es más, aun si nos permitimos un número infinito de enunciados, no existe ninguna manera de decir, utilizando enunciados de L_A, que todo número es igual a uno de los números 0, 1, 2, 3, 4... Para ver por qué, vale la pena tomar un pequeño desvío.

Símbolos, interpretaciones y modelos

Hasta ahora hemos utilizado los símbolos '0', '1', '2'..., a los que llamaremos numerales, para hablar de los números naturales 0, 1, 2... Pero podríamos emplear los numerales para denotar otros objetos. Por ejemplo, podríamos utilizar el numeral '0' para referirnos al número 0, el numeral '1' para denotar el –1, el '2' para hablar de –2, y así sucesivamente. De esta manera, obtendríamos una *interpretación* de los numerales diferente de la interpretación estándar.

Del mismo modo, el símbolo '+' podría usarse para denotar una función distinta de la adición. Por ejemplo, cabría estipular que '+' se refiere a la función que toma dos números del conjunto de enteros no positivos y selecciona el menor de ellos. Interpretado de esta manera, el enunciado

(8) $1 + 2 = 2$

sería verdadero, pues el menor de los objetos nombrados por '1' (es decir, –1) y por '2' (–2) es –2; esto es, el nombrado por '2'.

Por supuesto, los numerales podrían también emplearse para nombrar objetos no matemáticos. Supongamos que en un salón hay un número infinito de personas a las que vamos conociendo una por una. Podríamos usar el símbolo '0' para nombrar a la primera que conozcamos, el símbolo '1' para la segunda, y así sucesivamente. Luego, podríamos estipular que '+' se refiere a la función que toma dos personas y selecciona a la que hemos conocido primero.

En general, toda interpretación de L_A deberá especificar el conjunto de objetos al que nos referimos, lo que denominaremos el *universo* de dicha interpretación. Esto nos permite saber cuáles son todos los objetos de los que hablamos

cuando decimos «para todo x». (En las dos interpretaciones anteriores, nuestro universo corresponde al conjunto de números enteros no positivos y al conjunto infinito de personas en el salón, respectivamente.)

Una interpretación no solo debe decirnos qué objetos del universo son nombrados por cada uno de los numerales, sino también qué funciones corresponden a los símbolos '+' y '×'. Estas deben estar sujetas a la siguiente restricción: toda interpretación de '+' y de '×' debe denotar funciones que tomen dos objetos del universo y seleccionen un objeto del universo.

Dado un conjunto de enunciados C de L_A, diremos que una interpretación de L_A es un *modelo* de C si y solo si todos los enunciados en C son verdaderos en esa interpretación. Un modelo de C es, básicamente, una manera de entender los términos no lógicos de L_A en la que todos los enunciados en C son verdaderos.

El teorema de compacidad

Uno de los resultados fundamentales de la lógica matemática es el teorema de compacidad. Este nos dice que un conjunto de enunciados C tiene un modelo si y solo si todo subconjunto finito de C tiene un modelo. Como veremos a continuación, este teorema nos permite demostrar que, en L_A, no podemos decir que todo número natural es igual a uno de los números 0, 1, 2, 3...

Llamemos T_A al conjunto de todos los enunciados de L_A que son verdaderos en la interpretación estándar. El enunciado (1), por ejemplo, es un elemento de T_A, pero (2) no. En T_A hay un enunciado que nos dice que la adición es conmutativa: $\forall x\ \forall y\ (x + y = y + x)$. También hay uno que establece que la suma de dos números naturales es mayor o igual que cualquiera de ellos, así como otro que dice que, para cualesquiera x, y y z, $x \times (y + z)$ es igual a $x \times y + x \times z$.

Introduzcamos ahora un nuevo símbolo, 'n^*', y llamemos L^* al nuevo lenguaje. Consideremos ahora el conjunto I de todos los enunciados de la forma:

(9) $\forall x\ \neg(n^* + x = \tau))$,

donde la letra griega τ es reemplazada por alguno de los infinitos numerales de los que disponemos: '0', '1', '2'... I representa un conjunto infinito de enunciados de L^* que dice que n^* es mayor que todos los números naturales.

Si en L_A pudiésemos establecer que no existe ningún número distinto de 0, 1, 2, 3..., existiría un conjunto de enunciados en T_A tal que, en todo modelo de ese conjunto de enunciados, no habría ningún número distinto de 0, 1, 2, 3... Y si dicho conjunto existiese, el conjunto que contiene todos los enunciados de T_A y todos los enunciados de I, al que llamaremos $T_A + I$, no podría tener un modelo (ya que ningún modelo de T_A podría ser un modelo de I). Pero, como veremos a continuación, el teorema de compacidad implica que $T_A + I$ tiene un modelo.

Consideremos un subconjunto finito D de $T_A + I$. Puesto que D es finito, existe un número n_M mayor que todos los números nombrados en D. En particular, si un enunciado como (9) pertenece a D, entonces el número nombrado por el numeral que reemplaza a τ es menor que n_M. Si estipulamos que todos los símbolos de L_A reciben su interpretación habitual y que 'n^*' se refiere a n_M, tendremos una interpretación de L^* en la que todos los enunciados de D son verdaderos.

Como D puede ser cualquier subconjunto finito de $T_A + I$, podemos concluir que todo subconjunto finito de $T_A + I$ tiene un modelo. Y, utilizando el teorema de compacidad, obtenemos que $T_A + I$ tiene un modelo. Por tanto, no puede existir en L_A un conjunto de enunciados que diga que todo número natural es igual a '0', '1', '2'...

Ahora bien, dicho modelo de $T_A + I$ puede verse como una interpretación de L_A: basta para ello con «olvidar» qué objeto asignamos al nombre 'n^*'. De modo que tenemos un modelo de T_A en el que los nombres '0', '1', '2', '3'... denotan los números naturales y que, además, contiene objetos que difieren de todos los números naturales. Los modelos de T_A con esta propiedad se conocen como *modelos no estándar* de T_A. Su existencia implica que L_A no puede contener ningún enunciado que diga que todo número es igual a uno de los números estándar 0, 1, 2, 3...

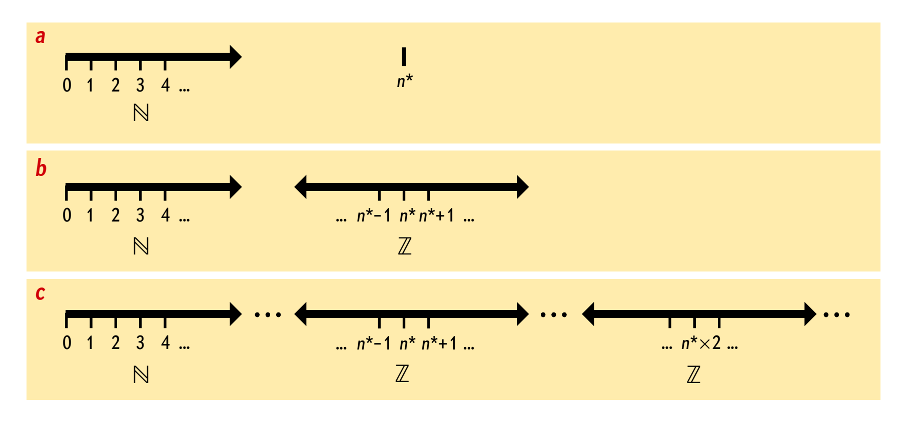
Para entender mejor todo lo que no podemos decir en L_A, merece la pena examinar cierta clase de objetos matemáticos que, desde el punto de vista de L_A, resultan indistinguibles de los números naturales.

Modelos no estándar de T_A

Consideremos una interpretación de L^* en la que todos los enunciados en I son verdaderos, y pensemos en ella como en un modelo no estándar de T_A. En tal interpretación debe existir un objeto, al que llamaremos n^*, mayor que todos los números naturales.

Ahora bien, n^* no puede ser el único objeto con dicha propiedad. Ello se debe a que uno de los enunciados de T_A nos dice que todo número cuenta con un sucesor, por lo que también n^* habrá de tener uno. Denotemos dicho sucesor mediante '$n^* + 1$'.

De igual modo, puesto que (6) es un enunciado de T_A, y dado que n^* no es igual a 0, n^* debe tener un predecesor, al que llamaremos '$n^* - 1$'. Generalizando este razonamiento, vemos que cualquier modelo de $T_A + I$ deberá contener los números estándar y, además, una «copia» de $\mathbb{Z}$, el conjunto de los números enteros



LA AMBIGÜEDAD DE LA ARITMÉTICA: El lenguaje de la aritmética, L_A, admite interpretaciones en las que sus referentes son conjuntos muy distintos de los números naturales. Los «modelos no estándar» de las verdades aritméticas incluyen una copia de $\mathbb{N}$ y, al menos, un elemento n^* mayor que todos los números naturales (*a*). Ello implica que dichos modelos deben incluir una copia completa de los números enteros, $\mathbb{Z}$ (*b*). Pero, a su vez, dicha copia implica la existencia de infinitas copias no equivalentes de $\mathbb{Z}$ (*c*), cuyo orden es similar al de los números racionales. Como consecuencia, L_A no nos permite definir qué son los números naturales.



(..., –2, –1, 0, 1, 2, ...). No solo eso, sino que cada uno de los elementos que viven en esa copia tiene que ser mayor que todos los números naturales (ya que si uno de ellos fuese igual o menor que algún número natural, n^* solo podría ser un número natural, lo cual sabemos que no es el caso).

¿Qué más podemos decir sobre nuestro modelo no estándar? Sabemos que existe un número que se obtiene al multiplicar n^* por 2. Ello se debe a que

(10) $\forall x \; \exists y \; (x \times 2 = y)$

es un enunciado de T_A.

Ahora bien, $n^* \times 2$ no puede vivir en la misma copia de $\mathbb{Z}$ en la que vive n^*. En otras palabras: para todo número estándar m, $n^* \times 2$ es mayor que $n^* + m$, ya que si existiese un número estándar m tal que $n^* \times 2$ fuese igual a $n^* + m$, tendríamos que $n^* = m$, pues

(11) $\forall x \; \forall y \; ((x \times 2 = x + y) \rightarrow (x = y))$

es un enunciado de T_A.

Pero, por definición, n^* es mayor que todo número estándar, por lo que no puede ser igual a ninguno de ellos. Esto implica que, después de la copia de $\mathbb{Z}$ en la que vive n^*, tiene que haber otra copia de los números enteros en la que viven $n^* \times 2$ y todos los sucesores y predecesores de $n^* \times 2$. Aplicando de manera recursiva el mismo razonamiento, podemos ver que, para cada objeto p de nuestro modelo (estándar o no), existe una copia de $\mathbb{Z}$ cuyos elementos son todos mayores que p.

Sabemos también que, para todo número m impar, $m + 1$ es par. Así que debe existir un número k tal que:

(12) $(2 \times k = n^*) \vee (2 \times k = n^* + 1)$.

Sea k^* uno de esos números. Sabemos que k^* no puede ser un número estándar. Ello se debe a que, para todo número m estándar, $2 \times m$ también es estándar y, por ende, menor que n^*, lo que le impide satisfacer cualquiera de las igualdades anteriores.

Pero, por otro lado, k^* tampoco puede vivir en la misma copia de $\mathbb{Z}$ en la que vive n^*. De lo contrario, y puesto que k^* es menor que n^*, existiría un número estándar m tal que $k^* + m = 2 \times k^*$. Y en tal caso tendríamos que $k^* = m$, dado que (11) es un enunciado en T_A.

De modo que entre la copia de $\mathbb{Z}$ en la que vive n^* y el conjunto de números naturales tiene que haber otra copia de $\mathbb{Z}$. Si generalizamos este argumento, podemos ver que no puede existir una copia de $\mathbb{Z}$ cuyos elementos sean menores que todo número no estándar que no viva en esa copia.

¿Cómo decir qué son los números naturales?

La situación ideal sería aquella en la que pudiésemos describir con todo el detalle necesario las propiedades de los números naturales. Sin embargo, la existencia de modelos de T_A con las propiedades que hemos mencionado aquí implica que hay estructuras muy diferentes de los números naturales que resultan indistinguibles de estos desde el punto de vista de L_A. Es decir, que para todo enunciado E de L_A, E es verdadero en los números naturales si y solo si es verdadero en todo modelo no estándar de T_A.

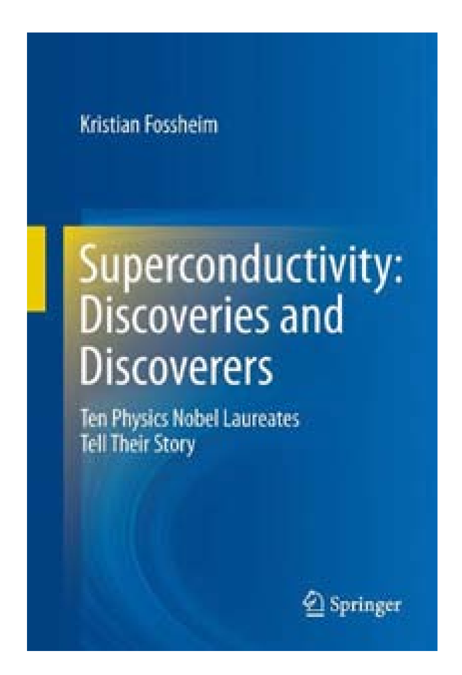
En particular, no existe ningún enunciado de L_A (ni tampoco un conjunto de ellos) que diga algo así como «los números naturales son el 0, el sucesor del 0, el sucesor del sucesor del 0... y nada más». L_A tampoco nos permite decir que, para todo número natural m, pueda llegarse a m a partir del 0 en un número finito de pasos. Y tampoco podemos decir que no existe un conjunto infinito de elementos a_0, a_1, a_2... tales que a_0 sea mayor que a_1, este mayor que a_2, etcétera. En otras palabras, ni siquiera podemos decir que el orden de los números naturales es un buen orden.

Por supuesto, el hecho de que en L_A no podamos expresar todo lo que tenemos que decir sobre el conjunto de los números naturales no implica que no exista un lenguaje con esa propiedad. El problema reside en que cada uno de los lenguajes formales que entendemos bien sufre limitaciones similares. En particular, si L es uno de estos lenguajes —uno en el que podemos hablar de la aritmética— y si T es el conjunto de enunciados verdaderos de L, existen modelos de T que son muy diferentes del conjunto de los números naturales.

¿Será que no es posible decir, en ningún lenguaje sensato, todo lo que debe decirse sobre algo aparentemente tan sencillo como los números naturales?

PARA SABER MÁS

Una excelente introducción al estudio de los lenguajes formales y sus interpretaciones es **Teoría de modelos**, de María Manzano (Alianza Editorial, 1989). El capítulo sobre los modelos no estándar de la aritmética contiene una discusión detallada de los personajes de los que hemos hablado en esta columna.



SUPERCONDUCTIVITY: DISCOVERIES AND DISCOVERERS. TEN PHYSICS NOBEL LAUREATES TELL THEIR STORY

Por Kristian Fossheim. Springer Verlag, Berlín, Heidelberg, 2013.

Superconductividad: un primer siglo sorprendente

Diez premios nóbel nos hablan de sus vivencias y descubrimientos

Nos encontramos ante un libro singular, compuesto, sabiamente, con las narraciones de unos héroes de nuestro tiempo, que, como escribía Proust refiriéndose a escritores y artistas, han contribuido con sus descubrimientos «a levantar parcialmente en nuestro honor el velo de miseria y de insignificancia que nos deja indiferentes ante el universo».

El autor, Kristian Fossheim, es un destacado científico que ha realizado a lo largo de su vida contribuciones muy relevantes en el campo de la física de los superconductores. Tal como señala en el prefacio, su objetivo al escribirlo era doble: por una parte, acercar al lector el lado humano de algunos grandes científicos; por otra, escuchar de sus propias voces cuáles fueron los pasos, muchos de ellos intensos y difíciles, que dieron para alcanzar el reconocimiento del premio Nobel de física. El hilo conductor ha sido la centenaria historia de la superconductividad, lo que añade amenidad por ser un fenómeno popularizado tras la aparición en escena de los superconductores de alta temperatura y, sobre todo, establece relaciones entre los personajes que aparecen, complementarios y próximos entre sí, en la aventura de los descubrimientos.

El primer siglo de la superconductividad coincide con un siglo de la historia de la humanidad lleno de convulsiones y cambios, los cuales se reflejan en la vida, en los métodos y en los intereses de varios de los gigantes de la ciencia que aquí se nos presentan. Aquí aparece la escuela soviética, dominada por la personalidad de L. D. Landau, la influencia de la Segunda Guerra Mundial en la ciencia de ambos lados del planeta, la contribución de las grandes empresas americanas a los avances científicos y muchos otros temas en los que el lector inteligente encontrará información y placer intelectual, al margen del tema concreto de la superconductividad.

El libro se divide en trece capítulos, de los cuales diez se dedican a sendos científicos que el autor ha seleccionado. Tras una breve, pero muy instructiva, biografía, se transcriben, contados en primera persona, los planteamientos científicos y vicisitudes personales que los llevaron a conseguir sus correspondientes logros. En un primer capítulo de introducción histórica se describen, entre otras, las contribuciones cruciales de H. Kamerlingh Onnes y W. Meissner, y se sitúa, adecuadamente, a los diez laureados en el tiempo y en sus momentos científicos. En el penúltimo capítulo, obra de A. Sudbø, se presenta, por su interés y actualidad, la profunda relación existente entre los mecanismos de la propiedad fundamental del estado superconductor (efecto Meissner) y el mecanismo de Higgs, que tanta popularidad adquirió tras la posible detección del bosón de Higgs en el LHC. Finalmente, en el capítulo decimotercero, el autor reflexiona, a modo de conclusión, sobre diversos asuntos que van desde la edad de jubilación de los científicos hasta la fascinación consciente de los físicos ante las eternas preguntas de los seres humanos: ¿Dónde comenzó todo esto?, ¿adónde vamos?...

El autor entrevistó a los diez laureados a lo largo de varios años. Ocho de ellos están entre los nueve que recibieron el Nobel por sus contribuciones en superconductividad, faltando únicamente J. Bardeen para completar un cupo en el que resulta difícil de entender la ausencia de W. Meissner; los dos restantes, P. W. Anderson y P. G. de Gennes, fueron premiados por investigaciones en otros temas, aunque son reconocidos universalmente por sus aportaciones al campo que nos ocupa.

La personalidad de los laureados queda de manifiesto, ofreciendo una diversidad de historias personales que comienzan con las de V. L. Ginzburg y A. A. Abrikosov, que llevaron a cabo las investigaciones teóricas que les valieron el Nobel de física en la URSS, durante la siniestra dictadura de Stalin, bajo la gigantesca figura científica y humana de Landau. Son muy interesantes las versiones que cada uno de ellos da de sus relaciones con este, y de cómo funcionaba aquella mítica Escuela de Física Teórica.

L. N. Cooper y J. R. Schrieffer rememoran cómo se incorporaron, y cuáles fueron sus papeles, al equipo creado y dirigido por J. Bardeen (ya entonces premio Nobel por el descubrimiento del efecto transistor), con el propósito de desarrollar una teoría microscópica de la superconductividad. Ambos transmiten de una forma muy vívida el ambiente de creatividad y excitación científica que vivieron entonces, sus contribuciones personales al éxito final y, sobre todo, el logro de un trabajo en equipo liderado por la férrea voluntad de Bardeen, convencido de que la gesta era posible. En I. Giaever descubrimos una personalidad fascinante, llena de humanidad y sentido del humor, que rentabilizó al máximo todas sus posibilidades para hacer el experimento que había que hacer en el momento en que había que hacerlo, confirmando con él la predicción fundamental de la teoría BCS. El capítulo dedicado a B. D. Josephson es singular por su contenido y por su brevedad. Nos hallamos ante una mente que, ya en la infancia, es prodigiosa para las matemáticas; publicó su contribución fundamental a los veintidós años y recibió el Nobel a los veintitrés.

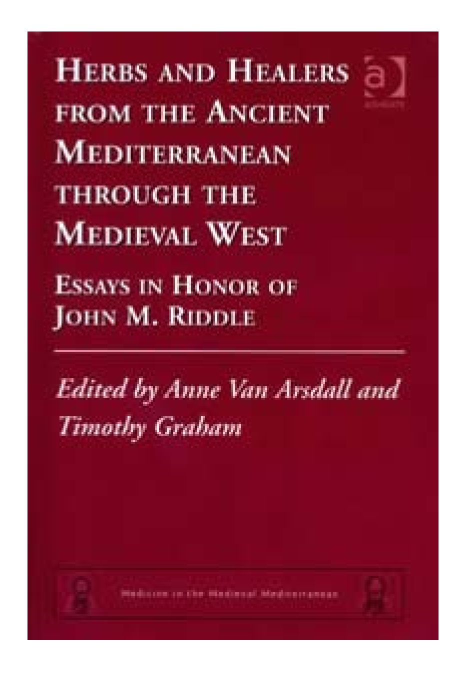
En el capítulo octavo llegamos a P. W. Anderson, una figura excepcional. En palabras del autor, «una de las mentes más influyentes en toda la física teórica de la segunda mitad del siglo xx». El acierto de esta afirmación resulta evidente tras la lectura del capítulo.

P. G. de Gennes es el séptimo físico teórico que aparece en el libro. Fue un físico muy versátil, que supo encontrar, y comunicar de forma singular, lo atractivo de la física en los diversos campos en los que se interesó. Es muy significativo que entre los cuatro científicos a los que considera sus maestros se encuentre uno al que no conoció personalmente: R. P. Feynman.

A continuación, dos capítulos dedicados a los descubridores de los superconductores de alta temperatura crítica: J. G. Bednord y K. A. Muller. La ciencia de materiales, cuya importancia ha sido, y sigue siendo, creciente y muy fructífera en muchos campos (entre ellos el de la superconductividad), se muestra aquí de la mano de un maestro con intuición e ideas, y de un joven con ambición y coraje, capaz de tomar iniciativas acertadas en una búsqueda en la que pocos creían.

Digamos para finalizar que estamos ante un libro entretenido, sugerente y de fácil comprensión para el lector culto con una mínima formación científica. Siendo breve (ciento treinta y cinco páginas), alberga numerosos temas de interés científico y humano, y constituye un gran documento al que, a buen seguro, acudirán los historiadores de la ciencia.

—Sebastián Vieira
Universidad Autónoma de Madrid



HERBS AND HEALERS FROM THE ANCIENT MEDITERRANEAN THROUGH THE MEDIEVAL WEST. ESSAYS IN HONOR OF JOHN M. RIDDLE

Dirigido por Anne van Arsdall and Timothy Graham. Ashgate; Surrey, 2012.

Materia médica

Base científica de la farmacia de la antigüedad clásica

La base naturalista de la medicina y la farmacia medievales tiene su razón geográfica en la cuenca mediterránea, campo de investigación en el que ha sobresalido John M. Riddle, a quien van dedicados los ensayos agavillados en el libro de cabecera. Un campo lleno de prejuicios que todavía perduran. Lo mismo en el mundo antiguo que en el medieval, buena parte del comercio internacional se dedicaba a las sustancias medicamentosas. Según defienden algunos, la caída del Imperio romano tuvo que ver con el desequilibrio comercial entre las importaciones de Oriente y las magras exportaciones de Occidente. La razón de los viajes de Colón fue el comercio con Oriente, con las islas de las especias, sinónimo de fármacos.

Se suponía que las drogas prescritas antes del advenimiento de la química o eran placebos o cumplían su función sanadora por mero azar. En no más de una veintena cifraba Harry F. Dowling los fármacos eficaces hasta la era moderna. Para someter a criba esa creencia generalizada, Riddle comparó los medicamentos mencionados en obras atribuidas a Hipócrates, todas ellas escritas entre el 440 a.C. y el 330 a.C., con cuatro guías contemporáneas de farmacia, farmacognosia y medicina herbalista. En total, los escritos hipocráticos recogen 257 fármacos. Todos, salvo 27, se encontraban en una o en varias de las cuatro guías actuales. De esos 27 especímenes, la mayoría eran alimentos (cohombros, por ejemplo) y tres eran productos animales (huevos, etcétera). Uno era el agua, que no entra en ninguna de nuestras guías farmacéuticas. Sin embargo, en el caso de deshidratación y similares, el agua cumple una función medicamentosa, puesto que se trata de una sustancia ingerida para restablecer la salud. (En efecto, en el período clásico, la farmacia abarcaba también la nutrición. La palabra griega y latina *diaeta* significa, en sentido amplio, tratamiento médico, que incluía el *pharmakon*. El *diaeteticus* era el profesional que ejercía la medicina, aunque no la cirugía.)

En un proceso de comparación inversa, Riddle empezó por los fármacos de origen natural, procedentes de resinas y combinaciones de resinas hoy en uso, unos 18 nombrados en la *Pharmacognosy* de Tyler, Brady y Robbers. Todos los que se extraen ahora en la cuenca mediterránea aparecían también en el *Corpus Hippocraticum* y escritos similares del mismo período. Lo mismo pudo decirse de alcaloides vegetales. De los 34 hallados en la guía moderna, todos los derivados de plantas mediterráneas se encontraban en plantas recogidas por autores de la antigüedad clásica. Citemos, por botón de muestra, los laxantes: los médicos hipocráticos empleaban dos especies de *Cassia* (comercializada contemporáneamente como Senokol, Laxagel y Perdiem), ruibarbo (que se vende como Grandel's Liver y Gallbladder Tablets), áloe, lino, zaragatona, ricino, etcétera.

Nada tiene, pues, de extraño que se hayan intensificado los trabajos de recuperación de plantas de las farmacopeas clásicas tras certificarse su eficacia terapéutica. Un caso paradigmático es el del hipérico (*Hypericum perforatum* L), celebrado hace unos años por sus recién descubiertas propiedades contra la depresión. El hipérico ha formado parte de la materia médica occidental durante milenios. La recogen Dioscórides, Plinio y Pablo de Egina, a la que se sumaron los herbarios medievales y renacentistas. La recomendaban para un amplio rango de problemas médicos: internamente, para provocar la micción y la menstruación, para rebajar fiebres tercianas y cuartanas, para aliviar el dolor de ciática y expulsar humores biliosos; externamente, para sanar heridas

y quemaduras. Se le atribuían, además, propiedades abortivas. En el Medievo se la conocía por *fuga daemonum*, lo que ya sugería su función contra la melancolía. La hierba de San Juan, como también se la denomina, crece por toda Europa y fue introducida en América.

En la línea de esa revisión de las farmacopeas históricas se ha iniciado un proyecto en el que participan médicos, farmacéuticos y botánicos. El propósito es crear una base datos informática, que abarca remedios mencionados entre el 500 y el 1500 de la era cristiana. El área geográfica se reduce de momento al Mediterráneo y al Occidente medieval.

El libro de reseña se abre con la mítica Cleopatra. Habla la leyenda de sus conocimientos y habilidad en el manejo de drogas, venenos y perfumes. Se dice que aplicó ese dominio de la materia a su propio suicidio indoloro. En un papiro recuperado en Herculano hay ocho columnas de un poema latino sobre la batalla de Actium (*De bello actiaco*), acontecimiento militar ocurrido el 31 a.C., en el que Octavio emergió victorioso sobre Antonio y Cleopatra. El autor del poema, verosímilmente Rabirius, perfila con detalle los caracteres de los protagonistas. De esas ocho columnas hay dos consagradas a Cleopatra y sus experimentos sobre formas de asesinar. También Plutarco, en su *Libro de Antonio*, ofrece detalles de los experimentos despiadados de Cleopatra con esclavos y criminales, en busca de venenos eficaces y rápidos. Parece clara su destreza entre ponzoñas y fármacos, serpientes venenosas y otros organismos letales y nativos de Egipto. Plutarco declara que basó buena parte de su relato sobre la muerte de Cleopatra en un médico llamado Olimpo, presumible testigo del suicidio de la reina.

En el mismo entorno nos encontramos con Filotas de Anfisa, joven médico al servicio de Marco Antonio Antilo (hijo mayor de Marco Antonio), formado en Alejandría, donde aprendió la doctrina común del hipocratismo y las nociones aristotélicas de los opuestos. La farmacología constituía un apartado importante de la enseñanza médica en Alejandría, la que regía en la corte ptolemaica. Se procuraban preparados farmacéuticos que pudieran aplicarse a soldados y gladiadores, remedios compilados en el *kephalikon*, un prontuario de drogas y emplastos para fracturas craneanas y huesos rotos. El *kephalikon* de Filotas incluía los ingredientes esperados (cera de abeja, mirra, incienso, tierra eritrea, exudado gomoso de *Aristolochia*, alumbre, aceite de rosas, aceite de oliva, etcétera). Galeno escribió que el compuesto de Filotas era bueno para las heridas tenaces o difíciles de tratar y sanar. Filotas compuso también recetas en verso. Su dermatología cosmética reflejaba los ungüentos y polvos de Cleopatra. A la corte de Cleopatra perteneció también Dioscórides «Facas», miembro tardío de la secta de Herófilo y autor de 24 libros sobre asuntos médicos.

Con el desarrollo de las ciudades, dejaron de ser accesibles muchos simples vegetales (fármacos), reconocidos y perfectamente identificados por una sociedad campesina. Proliferó entonces un género literario de extraordinario éxito en la Edad Media: los «quid pro quo»; así se llamaban los listados de sustitución de unos fármacos por otros a los que se les suponían las mismas virtudes sanadoras. Salían al paso de un error común, de peligro potencial: confundir una planta por la forma de sus hojas u otras semejanzas morfológicas. Se llamaban también sucedáneos e incluso sinónimos. Ejemplos de sustituciones aceptadas eran, entre miles, la de abrótano por orégano e hipérico por hinojo hediondo.

En la Italia meridional, durante los siete decenios que van del 1040 al 1100, convergen tres tradiciones textuales: latina, griega y árabe. A lo largo del siglo XII, período en que Salerno se convirtió en centro de formación médica, la explicación glosada de los textos, la redacción de manuales terapéuticos, los comentarios escolásticos y la enseñanza sistemática ocuparon a maestros y discípulos. El primer texto salernitano conocido fue *Passionarius/Liber nosematon* de Garioponto de Salerno, redactado antes de 1050. Constituía un manual de patología y de las medidas terapéuticas correspondientes.

Hasta entonces, el saber médico, científico en general, estuvo reducido a restos clásicos que se habían conservado en los monasterios. En la Italia ostrogoda del siglo VI destacó la actividad de Casiodoro. En Rávena, la capital, se realizaron traducciones y reelaboraciones latinas de obras clásicas griegas, entre ellas textos médicos hipocráticos, de Galeno y Oribasio, con muy escasa resonancia. La empresa no cuajó. Casiodoro, en su retiro, fundó una escuela monacal, dotada de una buena biblioteca. Recomendó la adaptación del tratado de Dioscórides sobre materia médica.

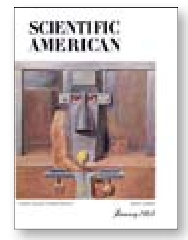
Por el norte, no lo tuvieron tampoco fácil los glosarios anglosajones cuando se enfrentaban a nombres latinos de las plantas medicinales que eran de origen mediterráneo, no británico, y que no se habían introducido todavía en la medicina nativa. Sus fuentes eran el Pseudo-Apuleyo y otros herbarios de la Antigüedad tardía. El problema se agravaba cuando el traductor se encontraba por vez primera con el nombre de una planta sin contexto que le facilitara la identificación. Pese a todo, los anglosajones tradujeron los nombres latinos y griegos de los simples con una eficacia que duró siglos. Fijémonos en el *Old English Herbarium*, escrito hacia finales del siglo X. Citemos el término *elehtre*. ¿A qué se refería? Tradicionalmente se consideró que era el lupino. Sin embargo, un análisis más riguroso lo ha puesto en cuestión y parece más adecuado asociarlo a plantas de raíz tuberosa o frutos redondeados. Ahora bien, que aunque nuestro conocimiento de la práctica médica en la Inglaterra anglosajona sea escaso y disperso, no significa que sus textos se amasaran con supersticiones y prácticas mágicas; buscaban darle una base racional.

El primer libro latino medieval que abordaba el comportamiento de los simples medicinales de acuerdo con la doctrina de las cuatro cualidades fundamentales y los cuatro humores fue el *Liber graduum*, que constaba de un prólogo seguido por un catálogo de remedios (los simples) con anotaciones explicativas de sus cualidades o grados, es decir, si la substancia era caliente en primer grado, húmeda en tercer grado, etcétera. Los antiguos establecieron que la complexión de todo simple medicinal constaba de cualidades dominantes que podían medirse en una escala de cuatro grados. Cada grado se dividía en tres secciones: inicio, medio y final. Cuando decimos que algo es caliente en determinado grado, hay que interpretarlo en comparación con la complexión del organismo.

La autoría del *Liber graduum* se atribuye a Constantino el Africano, la figura intelectual europea por excelencia del siglo XI. Trajo la racionalidad a Europa mediante sus traducciones de las obras médicas griegas y árabes al latín, compiló tratados clásicos y escribió textos originales. En un comienzo, el *Liber graduum* constituía la parte aplicada del *Pantgni* de Constantino, manual obligado en la formación académica.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Enero 1964

Guerra al tracoma

«Casi 500 millones de personas (un sexto de la población mundial) están infectadas de tracoma, nombre con que se conoce desde los tiempos de la Grecia clásica una enfermedad ocular que causa ceguera. Su origen no pudo identificarse de modo certero hasta hace menos de seis años. El responsable es un virus, o cuasivirus, de notable semejanza con el de la psitacosis y el linfogranuloma venéreo. Ese descubrimiento abre la fascinante perspectiva de que acaso sea posible controlar el mal mediante la vacunación y así poner fin a la larga existencia de una de las mayores calamidades de la humanidad. En EE.UU. la enfermedad casi ha desaparecido del "cinturón del tracoma" que se extendía de Virginia occidental a Oklahoma.»

En 1966 el patógeno fue identificado como una bacteria intracelular.



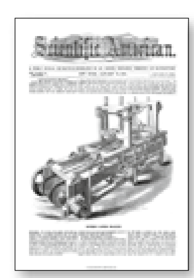
Enero 1914

Sobre el giroscopio

«Los enigmas del giroscopio han sido el tema que más interés ha suscitado en las conferencias sobre este mecanismo de la Asociación Cristiana de Jóvenes en China. Se compone de una robusta rueda de bicicleta con la llanta cargada con un tubo de plomo. Cuando se hace girar a gran velocidad con el armazón externo cerrado y se coloca de canto, se mantiene en pie con una leve escora lateral y precesiona lentamente en torno a un eje casi vertical. Se invita entonces a alguien del público a que tumbe al suelo la rueda valiéndose de un largo bastón con una bola de caucho maciza en el extremo (*véase la ilustración*). Por increíble que parezca, el hombre más fuerte es incapaz de derribarla. El experimento agrada mucho a la audiencia. Esta comprenderá entonces el modo en que una rueda de toneladas de peso que gira a miles de revoluciones por minuto confiere estabilidad a un vehículo monorraíl.»

El triunfo legal de los Wright

«El fallo dictado por las Cortes de Apelaciones de Estados Unidos en la demanda por violación de derechos presentada por la Compañía Wright zanja de una vez por todas, al menos en este país, la cuestión de quién inventó la máquina voladora. Desde luego, la mente popular nunca albergó duda alguna. El fallo certifica el veredicto popular y reconoce a Orville y Wilbur Wright como inventores del aeroplano motopropulsado para el transporte de personas. El éxito de los hermanos Wright radica no en el hecho de que construyeran un motor con sus propias manos, sino en que resolvieron un problema de aerodinámica que había desorientado a las mejores mentes científicas de todos los tiempos.»



Enero 1864

Diatriba satírica sobre el corsé

«Sres. de la Redacción: El aire que las damas tenemos que respirar aquí en Vermont circula por todo el mundo y lo respiran todas las inmundas criaturas sobre la faz de la tierra: rinocerontes, vacas, elefantes, tigres, marmotas, gallinas, mofetas, visones, saltamontes, ratones, mapaches y toda clase de chinches, arañas, pulgas y piojos, leones, fumadores de tabaco, pumas y linces, águilas, grajos, bebedores de ron, buitres, mascadores de tabaco, gorrinos, serpientes, sapos, lagartos y millones de otros repugnantes animales, aves, insectos y reptiles; y las señoras estamos obligadas a respirarlo después de ellos, ¡puaff!

Ahora queremos, y lo tendremos, algún artefacto que mantenga fuera de nuestros pulmones a tan fétida y repulsiva sustancia. Hemos probado los tres tipos de corsé de los que dieron ustedes noticia en su publicación el pasado año; pero en el mejor de los casos, y pese a ese desdichado artefacto, aún se colaba en nuestros pulmones una cucharadita de té de ese fluido repelente. Si de veras tales corsés sirven para que en el cuerpo no penetre ese aire desagradable, y nosotras no nos los vestimos correctamente, por favor vengan de inmediato en persona, o envíen a los inventores para mostrarnos cómo. Si se trata de un timo espero que los inventores sean embreados y emplumados y puestos a montar sobre un raíl. —Susie Pinkins»



A VUELTAS CON EL GIROSCOPIO: Demostración de la física del momento angular, China, 1914.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CX, N.º 4, 24 DE ENERO DE 1914

INNOVACIÓN

Materiales para soñar

Gerbrand Ceder y Kristin Persson

Mediante superordenadores y las ecuaciones de la mecánica cuántica, los científicos están diseñando nuevos materiales átomo a átomo.





EVOLUCIÓN

Otros orígenes de la complejidad de la vida

Carl Zimmer

¿De qué modo los seres vivos pueden crear estructuras refinadas sin selección darwinista?



ASTRONOMÍA

La herencia árabe

Paul Kunitzsch

Las huellas que los estudiosos árabes de la Edad Media dejaron en la ciencia europea se extienden hasta nuestros días.



SALUD

Los beneficios del ejercicio

Shari S. Bassuk, Timothy S. Church y JoAnn E. Manson

La actividad física resulta beneficiosa para el organismo por muchas razones más allá de las viejas conocidas.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Barcelona
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14 - 08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

Madrid
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Robledo: *Núcleos con forma de pera*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Carlos Lorenzo: *El rey de los animales*; Juan Pedro Adrados: *Mundos con dos soles*; Andrés Martínez: *La vida bajo una lente* y *Apuntes*; Fabio Teixidó: *Una solución integral al carbono*; Luis Bou: *Nuevas concepciones de la privacidad* y *¿Está Google cambiando nuestra mente?*; Juan Manuel González Mañas: *El largo camino hacia la comprensión del cáncer*; José Manuel Vidal Donet: *Moléculas especulares*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España